

Juhani Sarilo

Suolasirotinlaitteiston korroosio ja materiaalivalinta

Kemian, bio- ja materiaalitekniikan maisteriohjelma

Pääaine: Sustainable Metals Processing

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin
tutkintoa varten Espoossa 9.10.2017.

Valvoja

Professori Mari Lundström

Ohjaajat

Tekniikan tohtori Jari Aromaa

Diplomi-insinööri Ilkka Litendahl

Tekijä Juhani Sarilo

Työn nimi Suolasirotinlaitteiston korroosio ja materiaalivalinta

Koulutusohjelma Kemian, bio- ja materiaalitekniikan maisteriohjelma

Pääaine Sustainable Metals Processing

Työn valvoja Professori Mari Lundström

Työn ohjaajat TkT Jari Aromaa ja DI Ilkka Litendahl

Päivämäärä 9.10.2017

Sivumäärä 115+2

Kieli Suomi

Tiivistelmä

Tämän työn tavoitteena on selvittää Destia Oy:n suolasirotinautomaattien korroosion aiheuttamat kulut ja selvittää voidaanko materiaalivalinnoilla alentaa automaattien korjauskuluja korroosion osalta. Lisäksi selvitetään, onko eri laitevalmistajien ja eri vuosimallien automaateissa huomattavia kulueroja.

Liukkaudentorjunnalla tarkoitetaan liukkauden synnyn estämistä tai tienpinnan kitkan parantamista kemiallisesti tai mekaanisesti. Destia Oy käyttää liukkaudentorjuntaan Arctic Machine Oy:n Salo Combi -sarjan automaatteja, Nido Stratos -sarjan automaatteja ja Epoken valmistamia automaatteja. Käytettävät liukkaudentorjunta-aineet ovat natriumkloridi, kalsiumkloridi ja kaliumformiaatti. Epoken valmistamia automaatteja ei käsitellä tässä työssä.

Suolasirotinlaitteistot järjestettiin Destia Oy:n huoltohistoriasta korjauskulujen mukaan. Huoltokuluiltaan kymmenen halvimman ja kalleimman automaatin huoltolaskuista listattiin vaihdetut osat ja niiden hinnat. Näistä osista valittiin vaurioanalyysiin karamoottori, HD-moottori OMP 32, pulssianturi PNP, kevenninjousi ja liuospumppu. Osien materiaalianalyysi suoritettiin Oxford instrumentsin X-MET 5100 analysaattorilla ja materiaalivalinta suoritettiin CES materiaalikannalla sekä painotetulla vertailumenetelmällä.

Korroosion aiheuttamiin kustannuksiin voidaan vaikuttaa materiaalivalinnoin vain kevenninjousen tapauksessa. Liuospumpun korroosiovaurioon voidaan vaikuttaa tiivistetyypin vaihdolla. Kaikissa muissa tapauksissa korroosionesto perustuu käyttäjäkoulutukseen ja huolelliseen pesuun käytön jälkeen. Automaattien vertailussa selvisi, että Arctic Machinen automaatit ovat käyttökuluiltaan halvemmat. Vuosimalleja vertaillessa selvisi, että Arctic Machinen vuonna 2006 käyttöönotetuilla automaateilla on korkeimmat kulut. Nämä kulut johtuvat onnettomuuksista johtuneista kuluista. Nido Stratos -sarjan automaateille ei voitu suorittaa vuosimallien vertailua, sillä kahta lukuunottamatta kaikki automaatit oli otettu käyttöön vuonna 2010 ja täten järkevää vertailua ei ollut mahdollista tehdä.

Avainsanat Korroosionesto, liukkaudenesto, materiaalivalinta

Author Juhani Sarilo

Title of thesis Corrosion and material selection of salt spreader

Degree Programme Master's Programme in Chemical, Biochemical and Materials Engineering

Major Sustainable Metals Processing

Thesis supervisor Professor Mari Lundström

Thesis advisors D.Sc Jari Aromaa and M.Sc Ilkka Litendahl

Date 9.10.2017

Number of pages
115+2

Language Finnish

Abstract

The goal of this thesis is to find out if it is possible to reduce the repair costs of Destia Oy's salt spreaders caused by corrosion with material selection. Also, in this work operating costs of spreaders are compared between models and different manufacturers.

De-icing can be accomplished by mechanical methods or liquid chemicals. Destia Oy has salt spreaders from Arctic Machine Oy, Nido and Epoke. Spreaders manufactured by Epoke are not included in this thesis. De-icing chemicals used by Destia Oy are sodium chloride, calcium chloride and potassium formate.

Spreaders were sorted by the operating costs found from Destia Oy's service history. Ten cheapest and ten most expensive spreaders were chosen and their repair bills were examined. Replaced parts and their costs were listed. From these parts, spindle motor, hydraulic motor OMP 32, pulse sensor, gas spring and liquid pump were selected for failure analysis. Oxford instrument's X-MET 5100 analyzer was used for the material analysis and the material selection was done with CES materials database and weighted-properties method.

Only in the case of the gas spring costs caused by corrosion can be reduced with the material selection. The corrosion failure of the liquid pump can be fixed by replacing the seal type. In all the other cases the prevention of corrosion is based on user training and washing of the spreader after use. The operating costs of the Arctic Machine Oy's spreaders are lower than Nido's spreaders according to the comparison of manufacturers. Arctic Machine Oy's 2006 model has the highest operating costs caused by accidents. 12 out of 14 spreaders manufactured by Nido are 2010 models so the reliable comparison between models cannot be done.

Keywords corrosion prevention, deicing, material selection

ALKUSANAT

Tämä työ tehtiin Destia Oy:lle ja se toteutettiin yhteistyössä Aalto-yliopiston kemiantekniikan korkeakoulun kanssa.

Haluan kiittää ohjaajaani diplomi-insinööri Ilkka Litendahlia mielenkiintoisesta aiheesta ja loistavasti sujuneesta yhteistyöstä diplomityön aikana. Erityiskiitos ohjaajalleni tekniikan tohtori Jari Aromaalle saamastani avusta diplomityön aikana. Lisäksi haluan kiittää Emeritus Professori Olof Forsénia, joka aloitti työni valvomisen sekä professori Mari Lundströmiä, joka valvoi työni loppuun. Kiitän myös diplomi-insinööri Vesa Lindroosia, joka antoi korvaamatonta apua vaurioanalyysin suorittamisessa.

Lopuksi haluan kiittää perhettäni ja erityisesti tyttöystävääni kannustuksesta aikoina jolloin työ ei tuntunut etenevän.

Kokkolassa 9.10.2017

Juhani Sarilo

1	Johdanto	1
2	Liukkaudentorjunta	2
2.1	Yleistä liukkaudentorjunnasta	2
2.2	Suolaus	2
2.2.1	Natriumkloridi	5
2.2.2	Kalsiumkloridi	6
2.2.3	Kalsium- ja natriumkloridin erot liukkaudentorjunnassa.....	9
2.2.4	Kaliumformiaatti	12
2.3	Suolasirotinlaitteistot ja niiden toiminta	15
3	Korroosio ja korroosionesto	25
3.1	Korroosion perusteet	25
3.1.1	Korroosioympäristöt	26
3.1.2	Sähkökemiallinen reaktio	29
3.1.3	Sekapotentialiteoria	32
3.1.4	Passivoituminen	35
3.2	Korroosiomuodot.....	35
3.2.1	Yleinen korroosio	37
3.2.2	Galvaaninen korroosio / Bimetallikorroosio	38
3.2.3	Piste- ja rakokorroosio	40
3.2.4	Valikoiva liukeneminen	45
3.2.5	Raerajakorroosio	45
3.2.6	Eroosiokorroosio ja kavitaatio.....	46
3.2.7	Jännityskorroosiomurtuma ja korroosioväsymä.....	48
3.2.8	Hiertymiskorroosio.....	51
3.3	Korroosionesto	53
3.3.1	Suunnittelu	54
3.3.2	Pinnoittaminen.....	56
3.3.3	Liuosympäristön muuttaminen	57
3.3.4	Sähköiset suojausmenetelmät	58
4	Materiaalinvalinta.....	60
4.1	Materiaalinvalinnan perusteet	60
4.2	Materiaalin valintamenetelmät	65
4.2.1	Ashbyn kartat	65
4.2.2	Esawin ja Ashbyn metodi	68
4.2.3	Painotettu vertailumenetelmä.....	69
5	Vaurioselvitysten suoritus	72
6	Tulokset ja tulosten tarkastelu	73
6.1	Tutkittavat suolasirotinlaitteiston osat	73
6.1.1	Karamoottori AM:n ja Nido Stratos automaateista	76
6.1.2	Hydraulimoottori OMP 32 ja pulssianturi PNP AM:n automaatista	87
6.1.3	Kaasujousi AM:n automaatista	93
6.1.4	Liuospumppu Nido Stratos automaatista	97
6.2	Automaattien kulujen vuosimallien ja valmistajien välinen tarkastelu	106
7	Yhteenveto	109
	Lähteet.....	111

Liitteet.....	116
----------------------	------------

1 Johdanto

Liukkaudentorjunnalla tarkoitetaan liukkauden synnyn estämistä tai tienpinnan kitkan parantamista kemiallisesti tai mekaanisesti. Talvihoidon tavoitteena on turvata yhteiskunnan toiminnalle tasokkaat, yllätyksettömät ja turvalliset liikenneolot. Destia Oy käyttää kolmen eri valmistajan suolasirotinlaitteistoja liukkaudentorjuntaan. Suolasirotinlaitteistot kärsivät korroosiosta erittäin paljon, sillä ne ovat koko käyttöikänsä suolan ja kosteuden kanssa tekemisissä.

Materiaalin valinta riippuu valmistettavan tuotteen tehtävästä, mutta se ei ole ainoa rajoite, sillä materiaalin valinta on sidottu myös tuotteen valmistustapaan ja haluttuun muotoon. Tämän lisäksi merkittävänä osana materiaalivalintaa on korroosionkestävyys, sillä materiaalin, jonka korroosionkestävyys on liian huono, ennenaikainen vaurioituminen voi johtaa kalliisiin huoltotaukoihin. Toisaalta tarpeettoman hyvä korroosionkestävyys materiaalissa nostaa turhaan hintaa. Materiaalivalinnan haaste onkin saavuttaa tarkoituksenmukaiset ominaisuudet mahdollisimman halvalla. Materiaalin valintaa varten on kehitetty erilaisia materiaalin valintamenetelmiä, kuten Esawin ja Ashbyn metodi, joka antaa kustannusarvion halutun tuotteen valmistukselle eri materiaalien ja valmistusprosessien yhdistelmillä.

Työn tavoitteena on selvittää Destia Oy:n suolasirotinautomaattien korroosion aiheuttamat kulut ja selvittää voidaanko materiaalivalinnoilla alentaa automaattien korjauskuluja korroosion osalta. Lisäksi selvitetään, onko eri laitevalmistajien ja eri vuosimallien automaateissa huomattavia kulueroja.

Työn teoriaosuudessa esitellään liukkaudentorjunnassa käytettävät suolat ja kalusto, esitetään korroosion ja korroosioneston perusteet sekä materiaalivalinnan perusteet ja joitakin materiaalin valintamenetelmiä. Työn kokeellisessa osuudessa esitetään suolasirotinautomaattien korjauskulujen analyysi, analyysi eri laitevalmistajien automaattien kuluista ja työhön valittujen osien vaurioanalyysit sekä materiaalivalinnat.

2 Liukkaudentorjunta

Tiehallinnon mukaan *talvihoidon tavoitteena on turvata yhteiskunnan toiminnalle tasokkaat, yllätyksettömät ja turvalliset liikenneolot. Tavoitteiden saavuttaminen edellyttää hoitotyöltä oikea-aikaisuutta, ripeyttä ja osuvia työmenetelmiä. Tieverkon hoidossa pyritään sosiaaliseen ja alueelliseen tasavertaisuuteen sekä oikeudenmukaisuuteen. Koko maassa noudatetaan yhtenäisiä periaatteita tiestön hoitoluokituksessa ja laatuvaatimuksissa. Tiesuolan pohjavesiä kuormittavaa vaikutusta vähennetään rajoittamalla suolan käyttöä sekä yleisesti että erityisesti pohjavesialueilla. Urakoitsijalta edellytetään suolauksen osaamista ja tarkkuutta, jotta mahdollisimman vähällä suolalla saadaan optimaalinen tulos.* (Tiehallinto 2001, s.7.)

2.1 Yleistä liukkaudentorjunnasta

Liukkaudentorjunnalla tarkoitetaan liukkauden synnyn estämistä tai tienpinnan kitkan parantamista kemiallisesti tai mekaanisesti. Perusedellytykset onnistuneeseen liukkaudentorjuntaan ovat:

1. Oikea-aikaisuus.
2. Toimivat ja oikein säädetyt koneet ja laitteet.
3. Henkilöstöllä riittävästi tietoa, ammattitaitoa ja halua toimia oikein.

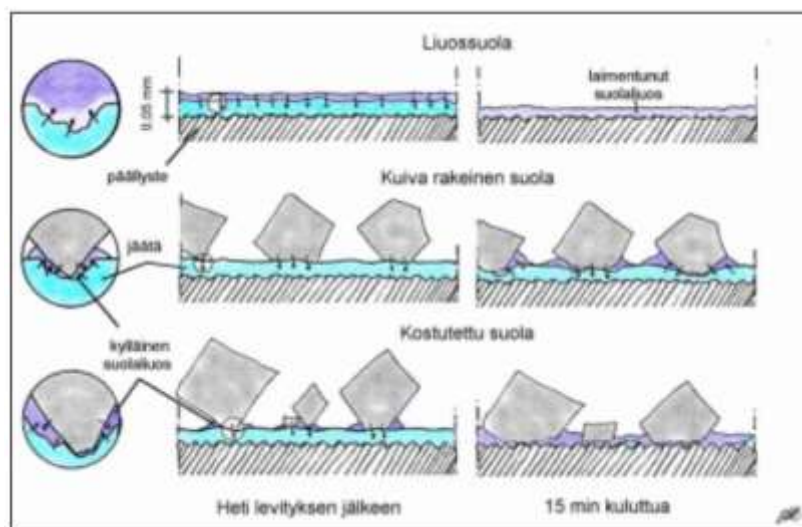
Liukkaudentorjuntaan paljaana pidettävillä teillä käytetään natriumkloridia NaCl ja kalsiumkloridia CaCl_2 , ja muilla teillä liukkaudentorjunta toteutetaan hiekoituksella sekä polanteen karhentamisella. Liukkaudentorjunta suunnitellaan toimenpideaikojen edellyttämällä tavalla. Ennakkosuolauksella pyritään siihen, että liukkautta ei synny ja toimenpideaika ei käynnisty. Toimenpideaika alkaa, kun tienpinnan kitka alittaa laatuvaatimuksissa esitetyt arvot. Ennakoiva liukkaudentorjunta on usein edellytys sille, että tiukoissa toimenpideoissa pystytään. (Tiehallinto 2001, s.36.)

2.2 Suolaus

Kemiallisessa liukkaudentorjunnassa estetään jään muodostuminen ennakkoon tai sulatetaan jo muodostunutta jäätä. Ilmiö perustuu veden sulamispisteen alenemaan

suolan vaikutuksesta. Jään sulaessa käytetty suolaliuos laimenee, mutta jos liuoksen ionivahvuus on riittävän suuri, niin liuos ei jäädy uudestaan kyseisessä lämpötilassa. Sulamislämpötilan alenema on lähes suoraan verrannollinen liuenneen suolan määrään. (Vestola 2006, s.14.) Liuosmuotoisten kemikaalien tehokkuuteen vaikuttavat merkittävästi yhdisteen kyky sitoa vettä eli hygroskooppisuus ja liuenneiden ionien aktiivisuus. Mitä korkeampi on liuenneiden ionien kokonaisuusaktiivisuus, sitä pienemmällä määrällä saadaan aikaan sulamispisteen alenema. (Vestola 2006, s.24.)

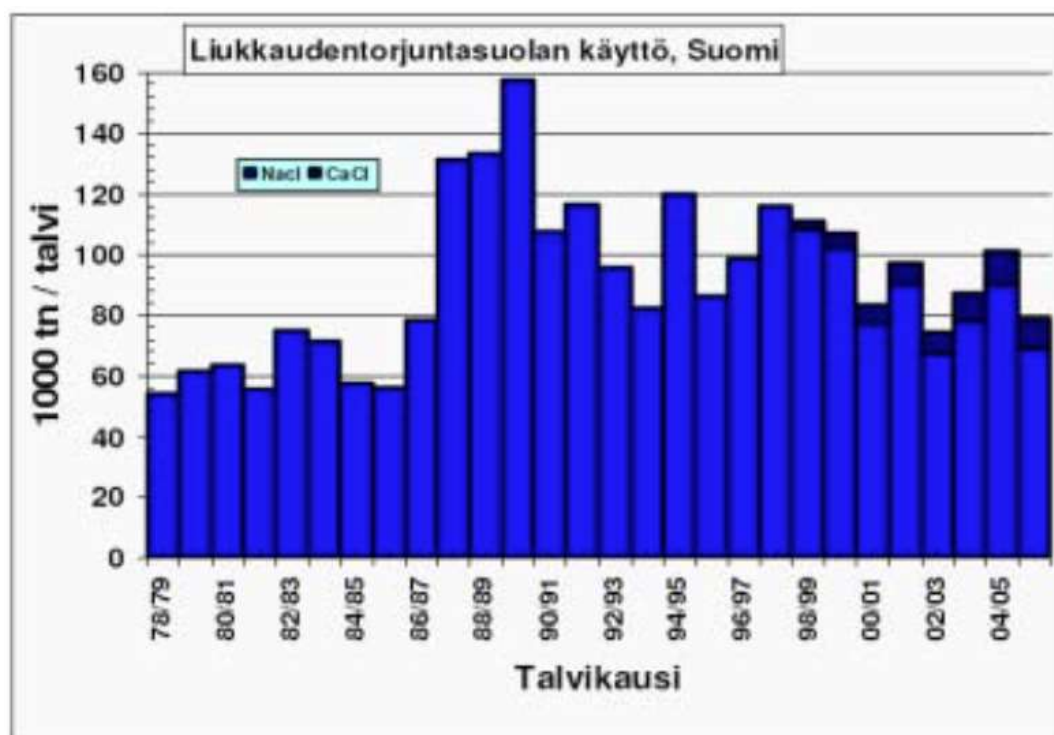
Suola voidaan levittää periaatteessa kuivana, kostutettuna tai liuoksena. Kuivan rakeisen suolan levittäminen Suomessa on kielletty suuren hävikin takia. Hävikki syntyy, kun rakeinen suola levittyy tienpinnalle satunnaisesti ja osa rakeista lentää heti levityksen yhteydessä luiskaan. Lisäksi kuivan suolan on imettävä kosteutta ennen kuin varsinainen sulatus pääsee käyntiin. Kostutetussa suolassa on tarvittava alkukosteus, joka parantaa kontaktia jään kanssa nopeuttaen vaikutusta. Kostutus lisää rakeiden painoa, sitoo hienoainesta ja vähentää hävikkiä sekä levitettäessä että tiellä. Kostutuksessa kuivaan suolaan lisätään 25-30 p-% suolaliuosta. Liuossuola levittyy tasaisesti ja laimenee tiellä olevaan kosteuteen. Liuossuolaus voi epäonnistua, mikäli tiellä on liikaa kosteutta tai kosteutta tulee lisää suolauksen aikana tai jälkeen. (Tiehallinto 2001, s.37.) Kuvassa 1 on esitetty periaatepiirros eri suolaustapojen jäänsulatusvaikutuksesta.



Kuva 1. Suolausmenetelmien vaikutus tienpinnalla heti levityksen jälkeen ja 15 minuutin kuluttua levityksestä (Tiehallinto 2001).

Käytännössä liuossuolan ja kostutetun rakeisen suolan levittäminen ovat toisiaan täydentäviä työmenetelmiä. Ennakkosuolaukseen, ohuen jääkalvon ja kuuran torjuntaan käytetään ensisijaisesti liuossuolausta. Liuossuolalla ei voi poistaa vahvaa jäätä tai lunta. Kylmempiin olosuhteisiin sekä suolaukseen lumisateen alle sopii kostutettu suola. (Tiehallinto 2001, s.38.) Yleisillä teillä suolakäyttö rajoittuu lähinnä vilkkaimpien teiden liukkaudentorjuntaa lämpötila-alueella 0-4 °C (Tiehallinto 2004, s.6). Teitä ei yleensä suolata alle -7 °C lämpötiloissa, mutta pienellä annoksella (n. 5 g/m²) liuosta on mahdollista vähentää liukkautta, jos liikennettä on riittävästi (Tiehallinto 2001, s.39).

Liukkaudentorjunnassa käytettävän suolan määrä on lisääntynyt 1960-luvulta ja suurimmillaan levitetyn suolan määrä oli vuonna 1990. Nykyään suolan käyttöä on vähennetty. (Tiehallinto 2004, s.6.) Kuvassa 2 on esitetty tiesuolan käyttömäärät Suomessa vuosina 1978-2006. Destia Oy:ssä käytetään liukkaudentorjunta-aineina natriumkloridia, kalsiumkloridia ja kaliumformiaattia (tuotenimeltään Meltium) (Huuskonen 2015).

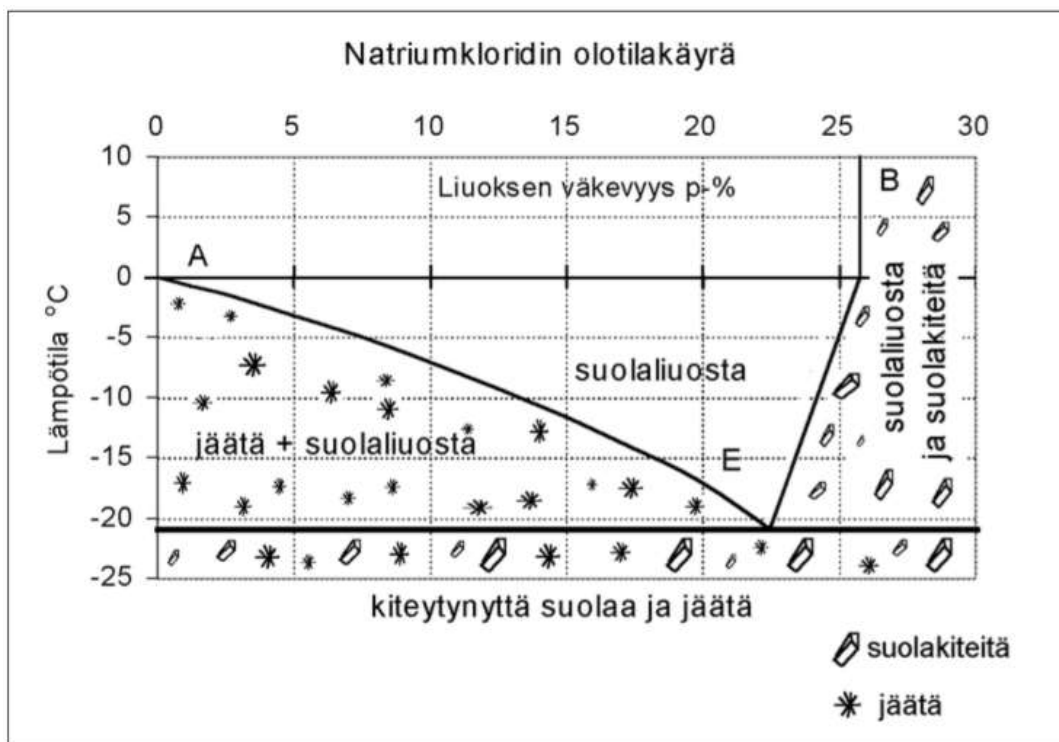


Kuva 2. Liukkaudentorjuntasuolojen käyttö Suomessa vuosina 1978-2006 (Vestola 2006).

2.2.1 Natriumkloridi

Vuorisuola eli natriumkloridi on maailmanlaajuisesti yleisesti käytössä oleva edullinen ja tehokas liukkaudentorjunta-aine (Hellstén 2001, s.14). Suomessa sen käyttö alkoi jo 1950-luvun lopussa (Vestola 2006, s.17). Natriumkloridi on ioniyhdiste, jossa jokainen natriumatomi on luovuttanut ainoan valenssielektroninsa kloorille, jolla on yhden elektronin vaje oktetista (Antila 2005, s.27). Natriumkloridi muodostuu kuutiollisista kiteistä, joissa sekä natriumin että kloorin koordinaatioluku on kuusi (Antila 2005, s.52).

Natriumkloridi on vesiliukoinen yhdiste, joka alentaa veden jäätymispistettä. Sen eutektinen piste eli alin jäätymislämpötila, joka voidaan saavuttaa tietyn suolan vesiliuokselle, on $-21,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ liuosväkevyydessä 23,3 p-%. Liukkaudentorjunnassa pyritään tähän liuosväkevyyteen, jotta natriumkloridista saadaan mahdollisimman hyvä sulatustehokkuus. (Vestola 2006, s.17.) Kuvassa 3 on esitetty natriumkloridin olotilakäyrä, josta optimaalinen sulatustehokkuus liuosväkevyyteen suhteutettuna tulee esille.



Kuva 3. Natriumkloridin olotilakäyrä (Tiehallinto 2001).

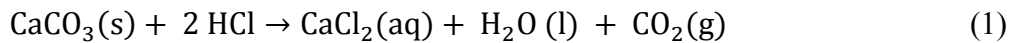
Kuivana levitettäessä natriumkloridi on tehokkaimillaan lämpötilan -4 °C yläpuolella. Lämpötilojen -4 °C ja -7 °C välillä se tehoaa vasta 30-45 minuutin jälkeen, sillä natriumkloridi vaatii tietyn ajan muodostaakseen tarpeeksi suolavettä, jotta jään ja lumen sulamisprosessi pääsee alkuun. (Vestola 2006, s.17.) Sulatustehokkuutensa natriumkloridi menettää lämpötilassa -9.4 °C. (Moran 1991, s.346).

Käytettävän natriumkloridin suolapitoisuus on oltava vähintään 97 p-% analysoituna kuivasta suolasta. Paakkuuntumisenestoainetta (kalium- tai natriumferrosyanidia) saa olla enintään 150 ppm (0,015 p-%). Suolan rakeisuudelle ei ole asetettu vaatimuksia. Perinteisesti talvisuolan maksimiraekoko on asetettu arvoon 5 mm ja hienoainesta on ollut enintään 5 p-%. Laadukkaassa suolassa vesipitoisuus on enintään 1,5 p-%, jolloin ei aiheudu varastointi- ja levitysongelmia. Liukenemattomat ainesosat ja epäpuhtaudet suolan seassa haittaavat liuoksen tekoa ja suolan sirottelulaitteiden käyttöä. Liukkaudentorjuntaan käytettävän suolaliuoksen NaCl-pitoisuuden tulee olla välillä 23-26 p-%. (Tiehallinto 2001, s.44.)

2.2.2 Kalsiumkloridi

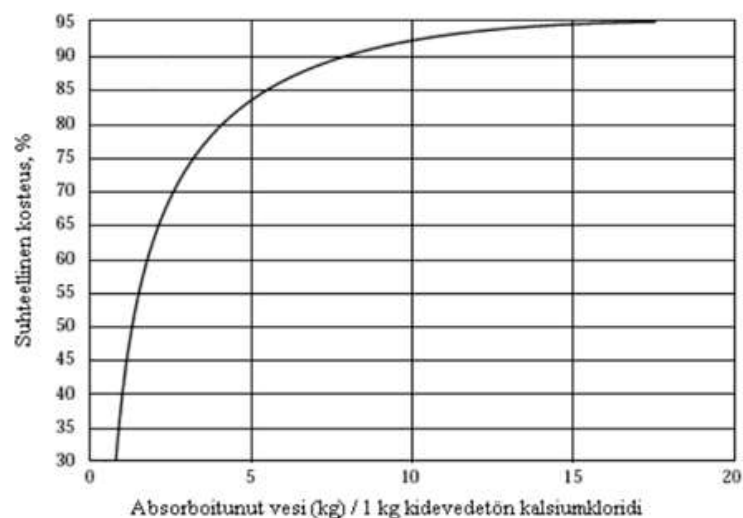
Sorateiden pölynsidonta ja niiden pinnan kestävyys parantaminen on kalsiumkloridin pääasiallinen käyttökohde, mutta sen käyttö talvisuolauksessa on lisääntynyt, ja vuonna 2006 noin 13 % käytetyistä liukkaudentorjunta-aineista oli kalsiumkloridia. Käyttöaste oli joillakin alueilla jopa 40 %, joten sen merkitys alueellisesti voi olla suuri. Erityisen tehokkaaksi kalsiumkloridi on osoittautunut mustan jään torjunnassa. (Vestola 2006, s.14.) Suomessa sallitaan kalsiumkloridin käyttö ainoastaan liuksena pieninä annoksina ja rakeisen natriumkloridin kostutukseen (Tiehallinto 2001, s.44). Kalsiumkloridilla kostutettua natriumkloridia käytettäessä suola pysyy paremmin tien pinnassa eikä kulkeudu tuulen ja liikenteen vaikutuksesta tien pinnalta pois (Vestola 2006, s.14). Kalsiumkloridi hankitaan yleensä valmiina 32 p-% liuksena (Tiehallinto 2001, s.44).

Kalsiumkloridia valmistetaan kalkkikivistä, natriumkarbonaatin valmistuksessa käytettävän Solvayn prosessin sivutuotteena sekoittamalla suolahappoa (HCl) ja kalsiumkarbonaattia (CaCO₃), kuten reaktioyhtälössä (1) on esitetty. (Vestola 2006, s.22).



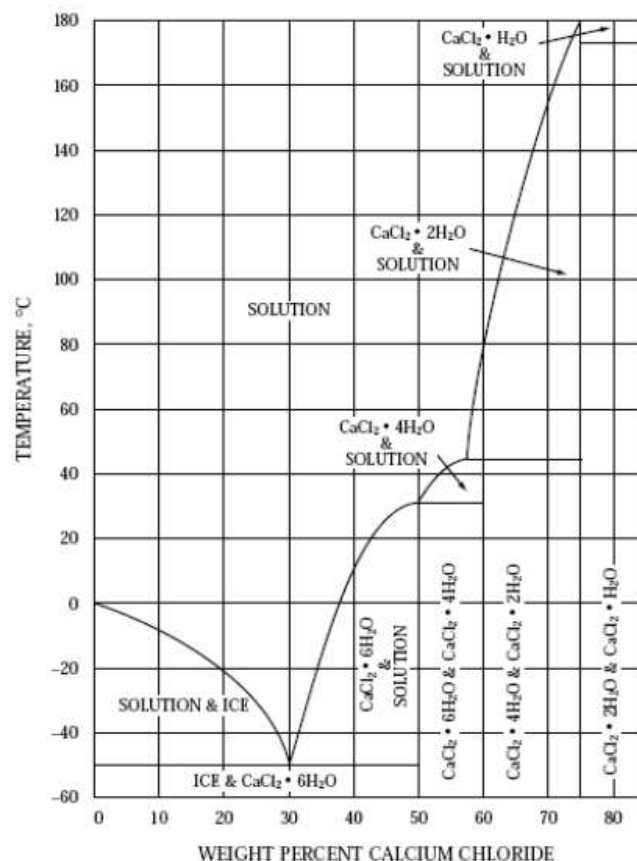
Kalsiumkloridi (CaCl₂) koostuu ionisidoksin toisissaan kiinni olevista kalsiumionista ja kahdesta kloridi-ionista (Vestola 2006, s.19).

Kalsiumkloridi on hygroskooppinen aine eli se imee itseensä vettä sekä muuttuu kiinteästä olomuodosta hyvin nopeasti liuosmuotoon ja tämän ominaisuutensa vuoksi se pystyy sulattamaan jäätä nopeammin kuin natriumkloridi. Lisäksi kalsiumkloridi sitoo sulamisessa vapautunutta vettä natriumkloridia alhaisemmassa lämpötilassa ja ilmankosteudessa. (Vestola 2006, s.14.) Kiinteä kalsiumkloridi sitoo ilmasta kosteutta liueten lopulta tähän absorboitunut kosteuteen. Liuosmuodossa kosteuden sitominen jatkuu niin kauan, kunnes tasapainotila saavutetaan eli kun liuoksen höyrynpaine on sama kuin ilmassa olevan veden osapaine. Ilmankosteuden kasvaessa veden tiivistyminen lisääntyy ja vastaavasti ilmakosteuden laskiessa liuoksesta höyrystyy vettä, kuten kuvasta 4 on nähtävissä. (DOW Chemical Company 2003, s.13.)



Kuva 4. Kidevedettömään kalsiumkloridiin absorboituneen veden määrän ja ilman suhteellisen kosteuden välinen tasapainokäyrä (25 °C) (Vestola 2006).

Kalsiumkloridi esiintyy myös kidevedellisenä yhdisteenä, mutta vain jos kalsiumkloridin pitoisuus on korkea, kuten kuvan 5 kalsiumkloridin faasidiagrammissa on esitetty. Heksahydraatti ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) on poikkeus, sillä sitä esiintyy runsaan jään mukana alhaisissa lämpötiloissa. Puhtaan kidevedettömän kalsiumkloridin ominaisuudet eroavat kidevedellisten yhdisteiden ominaisuuksista. Heksahydraatti, joka on eniten kidevettä ($6\text{H}_2\text{O}$) sisältävä kalsiumkloridi, vaatii liuetakseen lämpöä. (Vestola 2006, s.19.) Kirjallisuudessa mainitaan neljä kidevedellistä yhdistettä: $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{CaCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ja $\text{CaCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$. Kuvan 5 faasidiagrammista nähdään, että vaikka kalsiumkloridi liukenee helposti veteen normaaleissa lämpötiloissa, niin tietyissä lämpötiloissa ja koostumuksissa alkaa kalsiumkloridiliuoksesta erottua kidevedellistä kalsiumkloridia (DOW Chemical Company 2003, s.7). Kiinteän kalsiumkloridin liukeneminen veteen on hyvin eksoterminen reaktio, mutta liuosmuotoisen kalsiumkloridin laimennusreaktio on endoterminen (Vestola 2006, s.25).

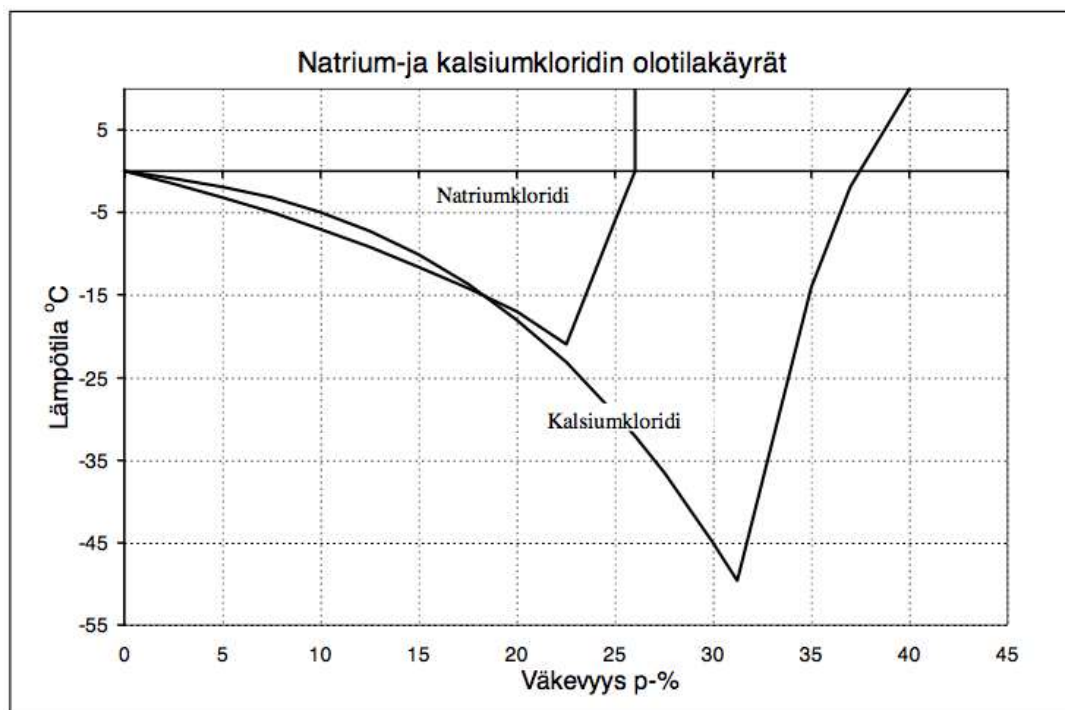


Kuva 5. Kalsiumkloridin ja vesiliuosten faasidiagrammi. Faasidiagrammissa viivat esittävät faasien välisiä tasapainokäyriä. (DOW Chemical Company 2003)

2.2.3 Kalsium- ja natriumkloridin erot liukkaudentorjunnassa

Kuten aiemmin todettiin, niin kemiallista liukkaudentorjuntaa suoritetaan käytännössä vain yli $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötiloissa, joten tässä kappaleessa ei keskitytä kalsium- ja natriumkloridin eroihin alle tuon lämpötilan. Lisäksi käsitellään vain liuosmuotoisen kalsiumkloridin ominaisuuksia, koska kiinteän kalsiumkloridin käyttö Suomessa on kiellettyä.

Suomessa lämpötila-alueella, jossa suolaa käytetään, natriumkloridiliuoksella ja kalsiumkloridiliuoksella ei ole merkittävää tehoeroa, kuten kuvan 6 olotilakäyristä käy ilmi (Tiehallinto 2001, s.45).



Kuva 6. Kalsiumkloridin olotilakäyrä natriumkloridin olotilakäyrään verrattuna (Tiehallinto 2001).

Kalsiumkloridiliuos on tietyissä väkevyyksissä hygroskooppinen, joten se pystyy sitomaan itseensä jäädästä peräisin olevaa ja lyhytkestoisen sulamisen seurauksena syntynyttä vettä estäen sitä jäätymästä uudelleen. Natriumkloridin tapauksessa veden täytyy pysyä kauemmin sulana, jotta liuokset ehtivät sekoittua, joten se toimii huomattavasti hitaammin. Kalsiumkloridi saattaa jättää tien pinnan

kosteaksi ja pahimmassa tapauksessa liukkaaksi, jos sen määrä pinta-alayksikköä kohden on liian suuri, sillä kalsiumkloridi sitoo ilmasta kosteutta, vaikka tien pinta olisi sula. Kalsiumkloridi sitoo siis enemmän kosteutta ilmasta kuin mitä tienpinnasta pääsee haihtumaan. Natriumkloridi sen sijaan pitää tien pinnan kuivana. (Ahlroos 2006, s.24.) Kaikki suolat imevät itseensä kosteutta tietyssä lämpötilassa ja kosteuspitoisuudessa ja toisaalta kosteuden imeytymistä ei tapahdu alhaisemmassa lämpötilassa ja kosteuspitoisuudessa (Houska 2005, s.16). Taulukossa 1 on esitetty natriumkloridille ja kalsiumkloridille lämpötilat ja suhteellisen kosteuden arvot, joissa kosteuden imeytymistä tapahtuu.

Taulukko 1. Lämpötilat ja kriittiset suhteellisen kosteuden arvot, joilla natrium- ja kalsiumkloridi alkavat adsorboida vettä (Houska 2005).

Lämpötila (°C)	Kriittinen suhteellinen kosteus (%)	
	CaCl ₂	NaCl
0	45	0
10	41	76
25	30	76

Kalsiumkloridi, kaksivalenssisena suolana, vapauttaa liuetessaan kolme ionia (1 Ca²⁺-ioni, 2 Cl⁻-ionia), kun taas natriumkloridi, yksivalenssisena suolana, vapauttaa kaksi ionia (1 Na⁺-ioni ja 1 Cl⁻-ioni) moolia kohden (Moran 1991, s.347). 32 p-% kalsiumkloridiliuos sisältää määrältään enemmän ioneja massayksikköä kohden kuin 23 p-% natriumkloridiliuos, joten kalsiumkloridiliuosta tarvitaan n. 10 % vähemmän kuin natriumkloridiliuosta saman sulamispisteen aleneman saavuttamiseksi. Kyseisellä annostuksella kalsiumkloridi vapauttaa myös n. 33 % enemmän kloridi-ioneja. (Ahlroos 2006, s.24-25.)

Natriumkloridin liukenemislämpö (25 °C, 1 atm) on +4 kJ/mol ja kalsiumkloridiliuoksen liukenemislämpö (25 °C, 1 atm) on +20 kJ/mol eli molemmat ovat endotermisia reaktioita. (Vestola 2006, liite1). Lämpömäärät ovat kuitenkin mitättömiä verrattuna laimentamiseen käytettävän jään sulamislämpöön (Ahlroos 2006, s21).

Eräät tutkimukset viittaavat kalsiumkloridin olevan vähemmän syövyttävää kuin natriumkloridin, mutta toisaalta auton rakenteita kosteana pitävää hygroskooppisuutta pidetään suurempana korroosioriskinä. Molemmat suolat vaikuttavat samankaltaisesti pohjavesiin. (Tiehallinto 2001, s.45.) Tuoreemmassa selvityksessä päädyttiin lopputulokseen, että rakennettuun ympäristöön kalsiumkloridi vaikuttaa natriumkloridia haitallisemmin, kun taas vaikutukset luonnonympäristöön ovat samansuuruiset tai hieman pienemmät kuin natriumkloridilla (Vestola 2006, s.63). Kalsiumkloridi kiihdyttää jarrulevyjen korroosiota enemmän kuin natriumkloridi. Lisäksi joissain tilanteissa kalsiumkloridi vähentää jarrulevyn ja palan välistä kitkaa. Vaikutus on suurempi kuin natriumkloridilla, kuten taulukosta 2 nähdään. Kitkakerroin vähenee eniten, kun jarrulevy on kostea (Vestola 2006, s.54.) Taulukossa 3 on esitetty kalsiumkloridin syövyttävyys ajoneuvoissa verrattuna natriumkloridiin.

Taulukko 2. Jarrulevyn ja jarrupalan välinen kitkakerroin eri tilanteissa (Vestola 2006).

Jarrulevyn ja jarrupalan välinen tila	Kitkakerroin
Kuiva	0,45
Märkä	0,3
NaCl-liuos	0,25
CaCl ₂ -liuos	0,15
MgCl ₂ -liuos	0,15

Taulukko 3. Kalsiumkloridin syövyttävyys ajoneuvoissa verrattuna natriumkloridiin (Ahloos 2006).

Sivuvaikutus	Kuvaus	CaCl ₂ vs. NaCl
Ajoneuvokorroosio		
Seostamaton hiiliteräs	<ul style="list-style-type: none"> - CaCl₂ syövyttävintä 2–6 % -liuoksilla, NaCl 10–20 % -liuoksilla. - CaCl₂ pitää teräksen pinnan kosteana pidempään kuin NaCl - CaCl₂ saattaa muodostaa suojaavan kalvon 	CaCl ₂ ~ NaCl
Sinkitty teräs	- CaCl ₂ syövyttävämpää kuin NaCl	CaCl ₂ > NaCl
Alumiini	- CaCl ₂ jonkin verran syövyttävämpää kuin NaCl	CaCl ₂ ~> NaCl
Ruostumaton teräs	- CaCl ₂ syövyttävämpää kuin NaCl matalilla ilmankosteuksilla	CaCl ₂ > NaCl

2.2.4 Kaliumformiaatti

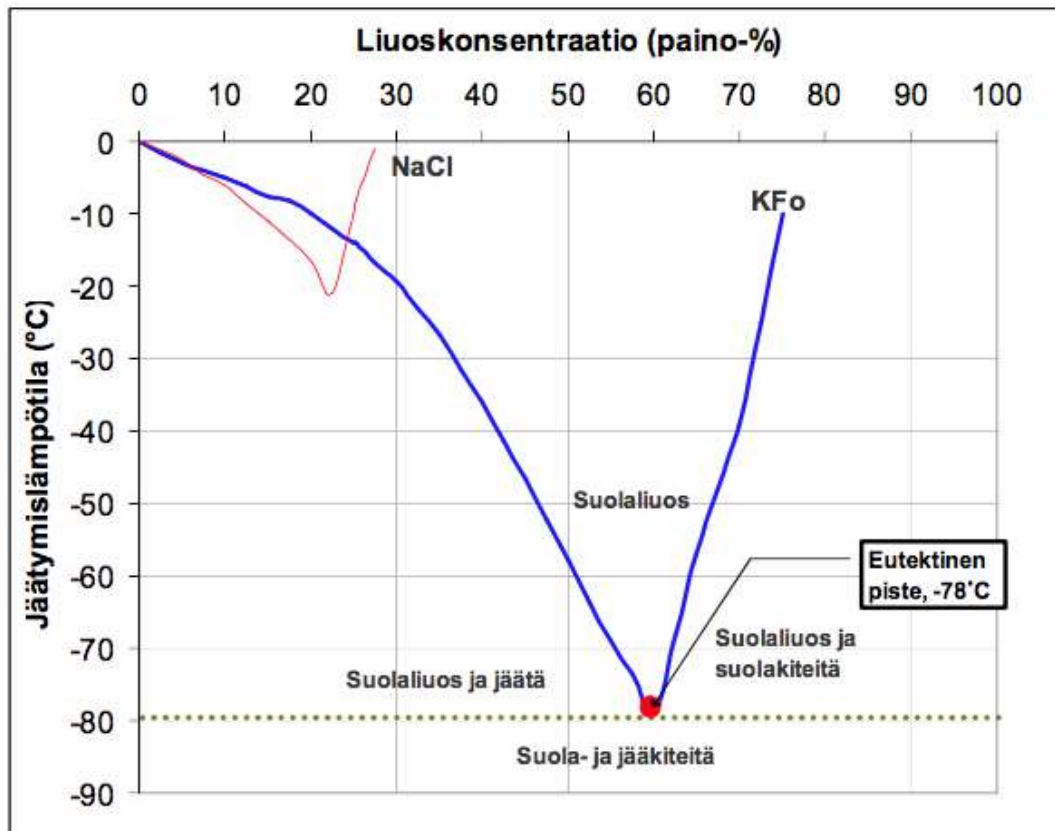
Natriumkloridille etsitään vähemmän ympäristöä ja pohjavettä kuormittavia vaihtoehtoja, ja kaliumformiaatti on yksi potentiaalinen vaihtoehto. Se on 10-15 kertaa perinteistä tiesuolaa kalliimpaa (35 € / 100 kg), mutta sen syövyttävä vaikutus vesijohtoverkkoihin, autoihin ja siltoihin on huomattavasti pienempi (Kivelä 2003, s.18-20). Suomessa kaliumformiaattiliuoksen (50 p-%) koekäyttö aloitettiin talvikaudella 2002-2003 Kauriansalmen pohjavesialueella. Lisäksi sitä käytetään Raippaluodon sillalla ja usealla lentoasemalla. (Kerko 2005, s.5.) Muita markkinoilla olevia formiaattipohjaisia liukkaudentorjunta-aineita ovat mm. natriumformiaatti ja kalsiumformiaatti. Formiaatit ovat yksinkertaisia orgaanisia hiiliyhdisteitä. Kaliumformiaatti on puhdas, väritön ja hajuton. Formiaatin 50%-liuoksen jäätymispiste on alle -50 °C ja se liukenee veteen täydellisesti, kuten kuvasta 7 nähdään. Kaliumformiaatti (KCOOH) on muurahaishapon (HCOOH) kaliumsuola ja sen valmistukseen käytetään muurahaishappoa ja kaliumhydroksidia (KOH) reaktion (2) mukaisesti: (Hellstén 2001, s.13.)



Kaliumformiaatti dissosioituu vedessä yhdenarvoiseksi K^+ ja HCOO^- -ioniksi reaktion (3) mukaisesti: (Hellstén 2001, s.13).



Kaliumformiaatti hajoaa ympäristössä biokemiallisesti kuluttaen samalla happea (Hellstén 2001, s.13). Osa kaliumformiaatin dissosioitumisesta muodostuvista K-kationeista päätyy maaperään (Hellstén 2001, s.45).



Kuva 7. Kaliumformiaatin ja natriumkloridin faasidiagrammit. Kuvasta on nähtävissä, että NaCl on KCOOH:ta tehokkaampaa sulattamaan jäätä aina sen eutektiseen pisteeseen asti (n. 23 p-% ja -21 °C). (Alatyypö 2008)

Kaliumformiaatti on hygroskooppinen kuten kalsiumkloridi, joten metalleille kertynyt kaliumformiaattikerrostuma pitää pinnan kosteana pidempään, jolloin syöpymisilmiö jatkuu pidempään verrattuna natriumkloridiin, joka ei ole hygroskooppinen. (Alatyypö 2008, s.17.)

Kaliumformiaatti johtaa erittäin hyvin sähköä. Kaliumformiaatin 1 p-% liuoksen sähkönjohtavuus on noin 9000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ja vastaavan natriumkloridiliuoksen sähkönjohtavuus on 17600 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Hyvä sähkönjohtavuus aiheuttaa galvaanista korroosiota sekä sähköliittimien korroosiota ja oikosulkuja. Kaliumformiaatin pH on normaalisti välillä 11-14 eli se on erittäin emäksinen aine. Kaliumformiaattituotteiden pH on 9-12 eli puhdasta ainetta alhaisempi (Alatyypö 2008, s.17.) Metallien korroosio kiihtyy yleensä happamissa oloissa (pH alle 7), mutta sinkki syöpyy erittäin nopeasti emäksisissä olosuhteissa (Hillerns 2001, s5).

Taulukossa 4 on esitetty kaliumformiaatin korroosionopeuksia sinkityille materiaaleille verrattuna natriumkloridin korroosionopeuksiin.

Taulukko 4. Sinkittyjen materiaalien korroosionopeudet ($\mu\text{m/a}$). Tyhjissä kohdissa korroosionopeus todennäköisesti yli $100 \mu\text{m/a}$. (Alatypö 2008)

Liuos	Sähkö-sinkitty	DP800 sinkitty	DP600 Galvannealed	DP600 kuuma-sinkitty	Kuuma-sinkitty kaide
23% NaCl	16±3	40±8			
2,3% NaCl	56±20	79±20	160±30	82±30	33±7
0,23% NaCl	88±6	85±10	95±20	110±10	17±2
0,023% NaCl	130±10	51±10	35±5	170±40	
50% Kfo	68±4	80±13	160±30	120±30	91±20
5,0% Kfo	40±10	78±20	58±12	110±20	24±4
0,5% Kfo	180±25	130±40	59±16	110±20	17±3
0,05% Kfo	220±50	120±9	59±5	300±30	27±7

Taulukossa 5 on esitetty kaliumformiaatin korroosionopeuksia eri metalleille verrattuna kalsiumkloridin korroosionopeuksiin ja taulukossa 6 kaliumformiaatin korroosionopeuksia eri metalleille verrattuna natriumkloridin korroosionopeuksiin.

Taulukko 5. Kalsiumkloridin ja kaliumformiaatin korroosionopeuksia ($\mu\text{m/a}$) eri metalleille. Korroosionopeuden raja-arvona on $10 \mu\text{m/a}$ Koejärjestelyt on toteutettu ASTM D 1384 mukaisesti. (Hillerns 2001)

	CaCl ₂ 28,3%		KCOOH 41 %	
	Puhdas	Inhiboitu	Puhdas	Inhiboitu
Kupari	20	15	70	5
Juote WL30	1390	1020	660	190
Messinki (MS 63)	110	60	30	0
Teräs (HI)	320	220	900	0
Valurauta (GG26)	1040	730	880	7
Valualumiini (AlSi6Cu4)	1250	980	210	3

Taulukko 6. Natriumkloridin ja kaliumformiaatin korroosionnopeuksia ($\mu\text{m/a}$) eri metalleille. Tyhjissä kohdissa korroosionopeus todennäköisesti yli $100 \mu\text{m/a}$. (Alatyyppi 2008)

Liuos	Alumiini (6000-sarja)	Kupari (Cu-OF)	Bake hardening teräs	Ruostumaton teräs AISI 304L
23% NaCl	$2,8 \pm 0,1$	55 ± 13		$3,0 \pm 1,0$
2,3% NaCl	$3,9 \pm 1,6$	$18 \pm 3,8$	130 ± 30	$0,5 \pm 0,2$
0,23% NaCl	$3,8 \pm 1,5$	$6,4 \pm 0,2$	110 ± 20	$0,4 \pm 0,1$
0,023% NaCl			150 ± 20	
50% KFo	$3,0 \pm 2,0$	$5,2 \pm 2,7$		$0,3 \pm 0,1$
5,0% KFo	$1,8 \pm 0,6$	$8,3 \pm 4,4$	$42 \pm 5,4$	$0,4 \pm 0,2$
0,5% KFo	$2,8 \pm 0,7$	$3,9 \pm 0,7$	110 ± 40	$0,2 \pm 0,1$
0,05% KFo			130 ± 20	

Taulukoista 4 ja 6 nähdään, että kaliumformiaatti on natriumkloridia syövyttävämpää vain sinkitylle teräkselle. Taulukosta 5 taas nähdään, että kaliumformiaatti ei ole puhtaana kalsiumkloridia syövyttävämpää ja inhiboituna se ei ole korrodoivaa. Orgaaniset aineet eivät yleensä vaikuta elastomeereihin, joita tiivisteet tavallisesti ovat, mutta kaliumformiaatti voi kulkeutua pienistäkin raoista matalan pintajännityksensä vuoksi, joten kaikki sähköliittimet tulee suojata mahdollisimman tiiviisti (Hillerns 2001, s.5).

2.3 Suolasirotinlaitteistot ja niiden toiminta

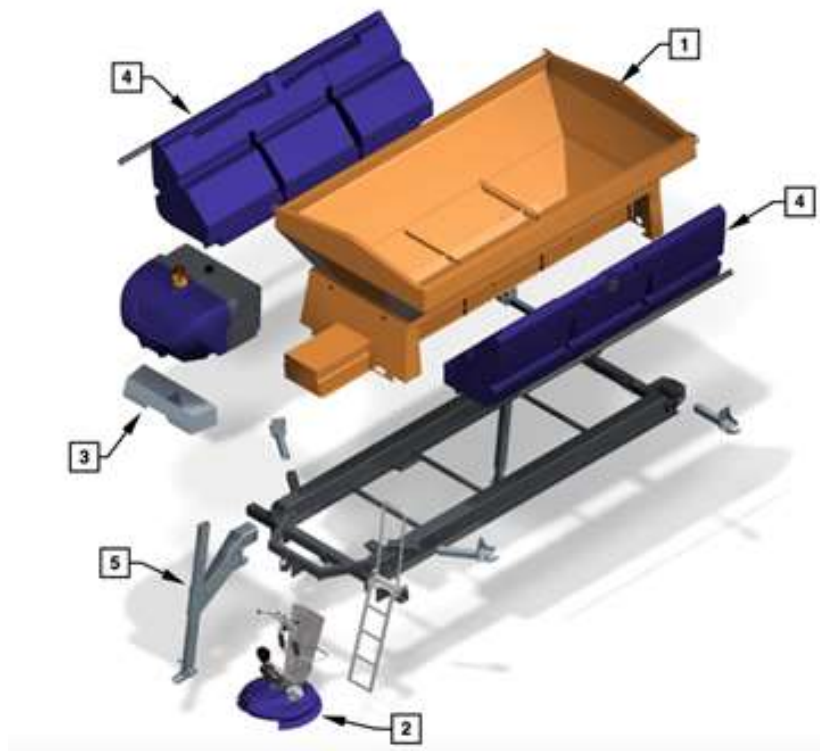
Destia Oy:ssä on käytössä kolmen valmistajan hydraulikäyttöisiä automaatteja: Arctic Machine Oy:n Salo Combi -sarjan automaatteja, Nido Stratos -sarjan automaatteja ja Epoken valmistamia automaatteja. Salo Combi -sarjasta on käytössä sekä matto- että ruuvikuljettimilla varustettuja versioita. Nido Stratos -automaatit ovat kaikki hihnakuljettimella varustettuja. Tässä työssä ei käsitellä Epoken valmistamia automaatteja. Automaatteja ei käytetä kesäisin, eikä linjahiekoitusta tehdä kuin tilapäisesti eli koneita käytetään käytännössä vain suolaukseen (Litendahl 2015). Molempien valmistajien laitteistot toimivat pääpiirteittäin samalla periaatteella, joten tässä kappaleessa esitellään suolasirotinlaitteiston toiminta pääosin Nido Stratos -laitteiston avulla.

Liukkaudentorjunta edellyttää nykyvaatimuksilla suolausautomaattien käyttöä. Automaatissa on kuivasuolasäiliö ja suolan kostutusta varten liuostankit. Laitteella voidaan levittää kuivaa suolaa, kostutettua suolaa ja vähäisissä määrin suolaliuosta. Automaatin toimintaa hallitaan ohjaamosta ja kuljettajalla on säädeltävissä suolan sirottelumäärä, -leveys, -suunta ja kostutuksen määrä. Kostutus tapahtuu levittimen lautasella tai juuri ennen lautasta. Konerikon sattuessa tai muuten väliaikaisena ratkaisuna kostutus voidaan suorittaa kuorma-auton lavalla ennen levitystä. Sopiva levitysnopeus kostutetulle suolalle on 40-50 km/h ja suurempi nopeus lisää suolan hävikkiä olennaisesti. Suola sirotellaan ajoradan keskelle 3 metrin leveydelle, sillä liikenne levittää suolan nopeasti koko ajoradalle. (Tiehallinto 2001, s.40.) Kuvassa 8 on esitetty suolausautomaatti levittämässä suolaa.

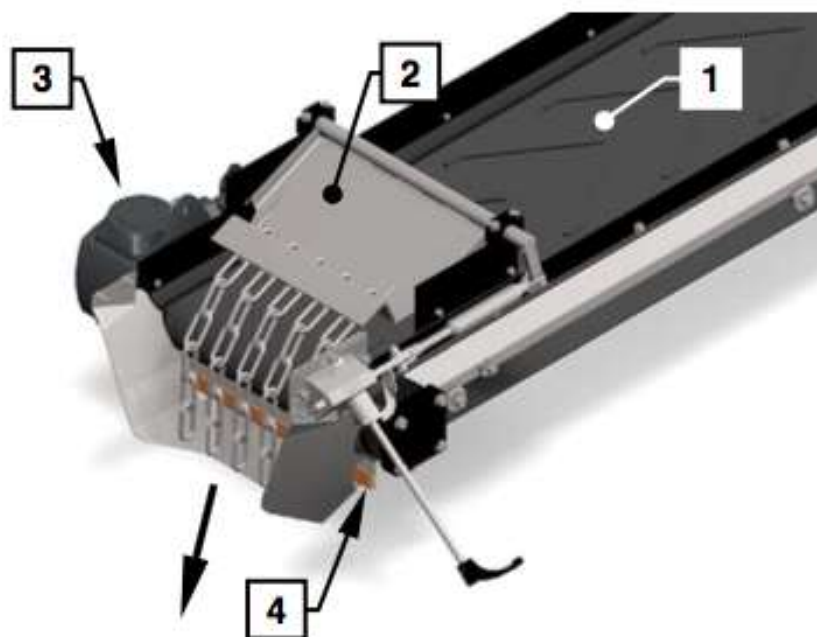


Kuva 8. Nido Stratos suolausautomaatti levittämässä suolaa (Aebi Schmidt 2014).

Kuvassa 9 on esitetty Nido Stratos -automaatin pääosat. Kuvassa 10 on esitetty Nido Stratos -automaatin käyttöjärjestelmä. Levitettävä materiaali siirretään hydraulimoottorin käyttämän kuljetinhihnan avulla annosteluluukun kautta syöttökourulle. Levitettävän materiaalin siirtomäärä hihnan kierrosta kohden voidaan säätää vakioksi annosteluluukun avulla. (Nido 2005, s.13.)

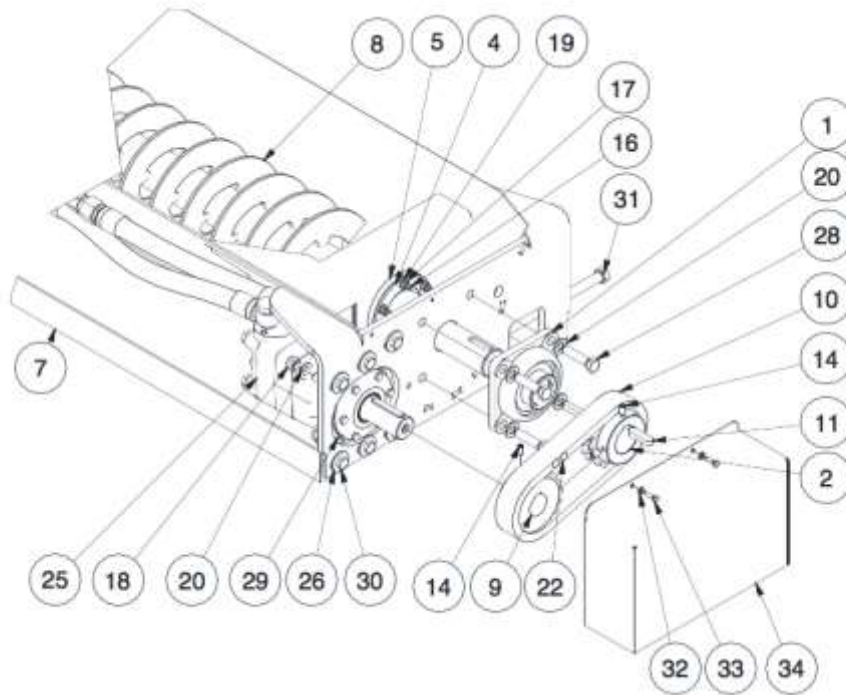


Kuva 9. Automaatin pääosat. 1. Materiaalisäiliö 2. Syöttökouru/Levityslautanen 3. Ohjausjärjestelmä 4. Liuostusjärjestelmä 5. Tukijalat. Kuvan osien lisäksi pääosiin kuuluu kuljetinjärjestelmä, käyttömekanismi ja hallintapaneeli. (Nido 2005)



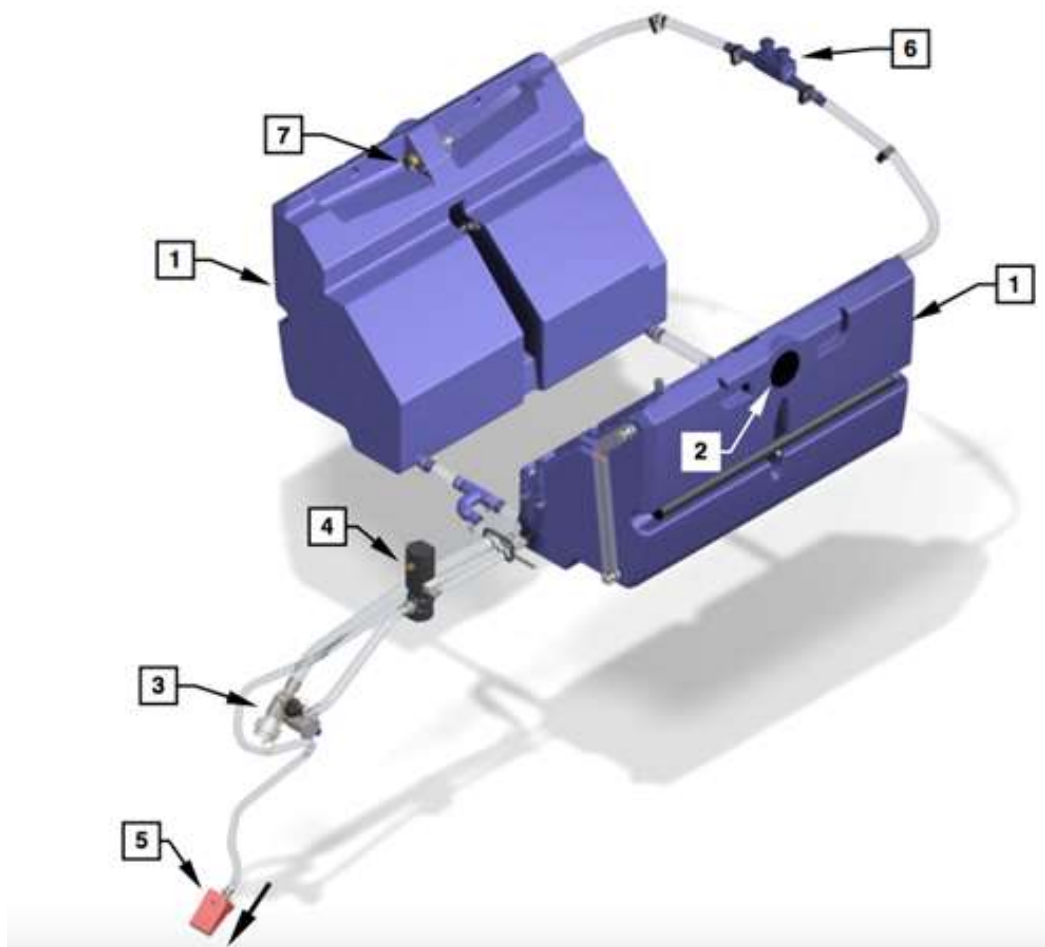
Kuva 10. Käyttöjärjestelmä. 1. Kuljetinhihna 2. Annosteluluukku 3. Hydraulimoottori 4. Annosteluluukun säätökahva. (Nido 2005)

Kuvassa 11 on esitetty AM Salo combi 5000 -sarjan automaatin ruuvikuljetin ja sen osat. Erona hihnakuljettimeen on lähinnä se, että suola siirretään hihnan sijaan hydraulimoottorin käyttämän ruuvin avulla syöttökourulle.



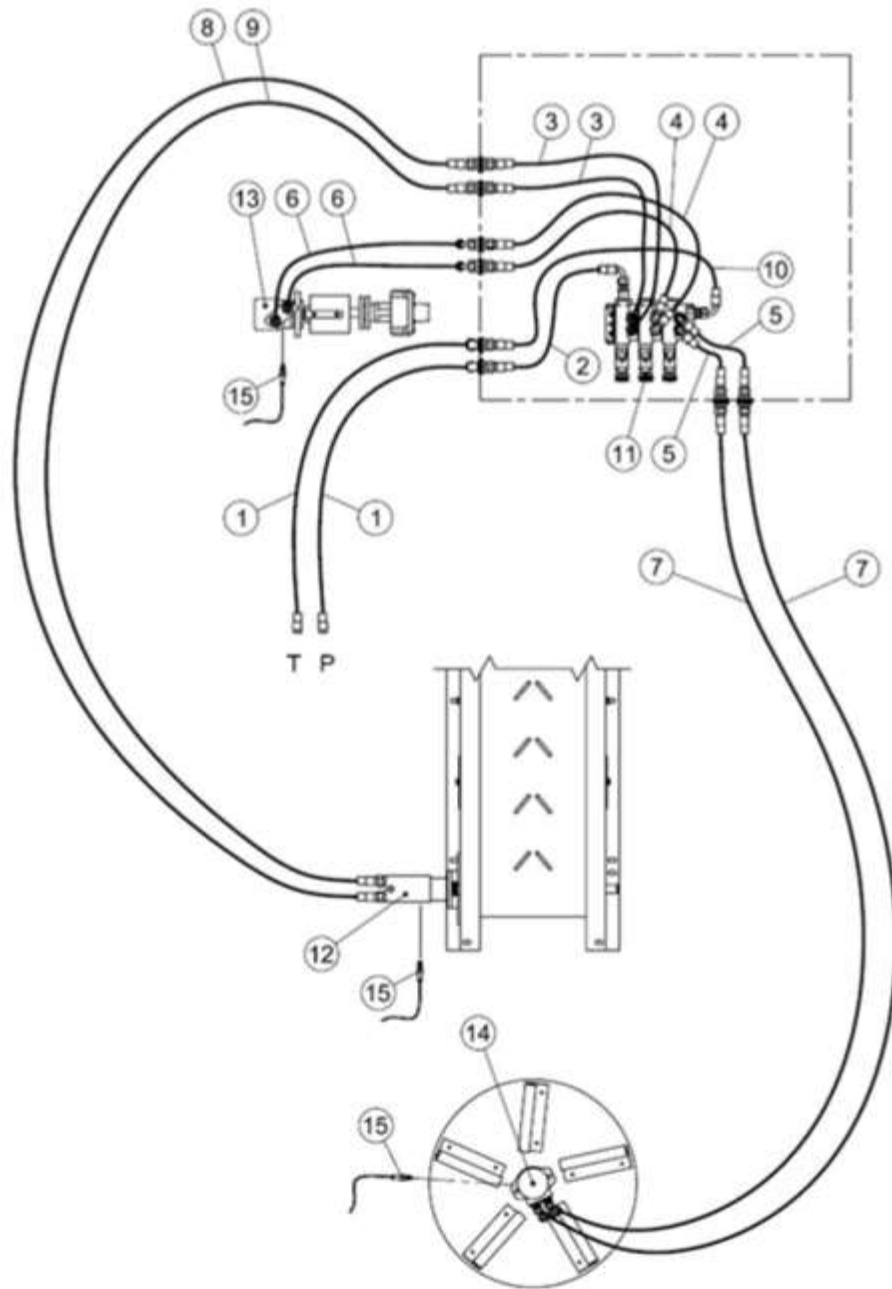
Kuva 11. AM Salo Combi 5000 -sarjan automaatin ruuvikuljetin. 1. Laippalaakeri 2. Ketjupyörä 7. Ruuvikuljetin 8. Syöttöruuvi 9. Ketjupyörä 10. Pariketju 25. Ruuvin hydraulimoottori 33. Hydrauliletkut (vain pääkomponentit esitelty). (Arctic Machine 2014b)

Kuvassa 12 on esitetty Nido Stratos -automaatin liuostusjärjestelmä. Liuostusjärjestelmän avulla voidaan lisätä liuosta kuivaan levitysainekseen. Hydraulimoottorin käyttämä liuospumppu pumppaa nestettä säiliöistä levitysjärjestelmälle. Ilmaventtiili estää yli- ja alipaineen syntymisen säiliöissä täyttämisen ja tyhjentymisen aikana. Liian suuren paineen syntyessä liuossäiliöihin, tulppa irtaantuu ja liika neste pääsee poistumaan järjestelmästä. (Nido 2005, s.16.)



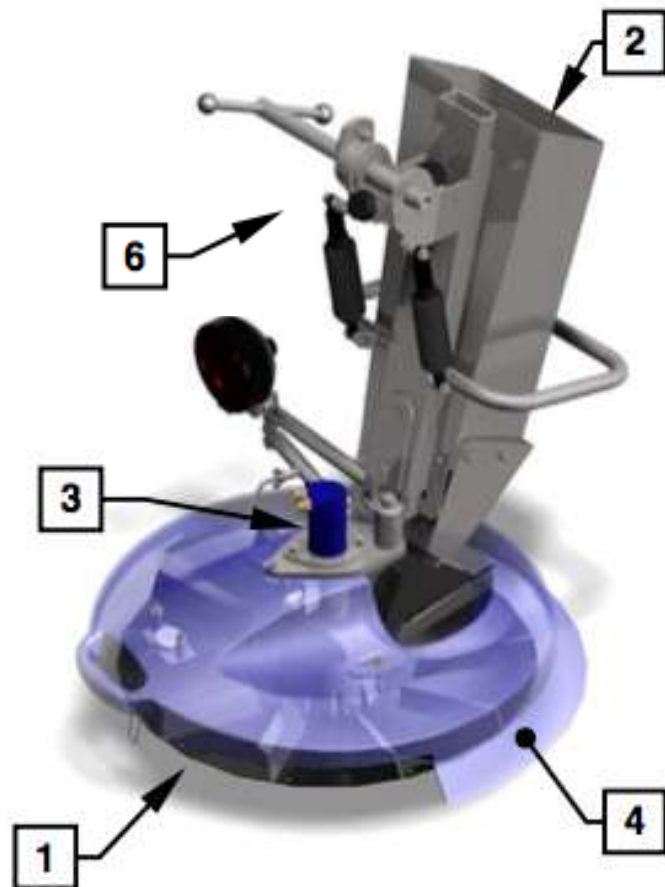
Kuva 12. Liuostusjärjestelmä. 1. Liuostussäiliö 2. Täyttöaukko 3. Takaliitin 4. Liuospumppu 5. Levitysjärjestelmä 6. Ilmaventtiili 7. Tulppa. (Nido 2005)

Kuvassa 13 on esitetty Salo Combi 3000 -automaatin hydraulikka.

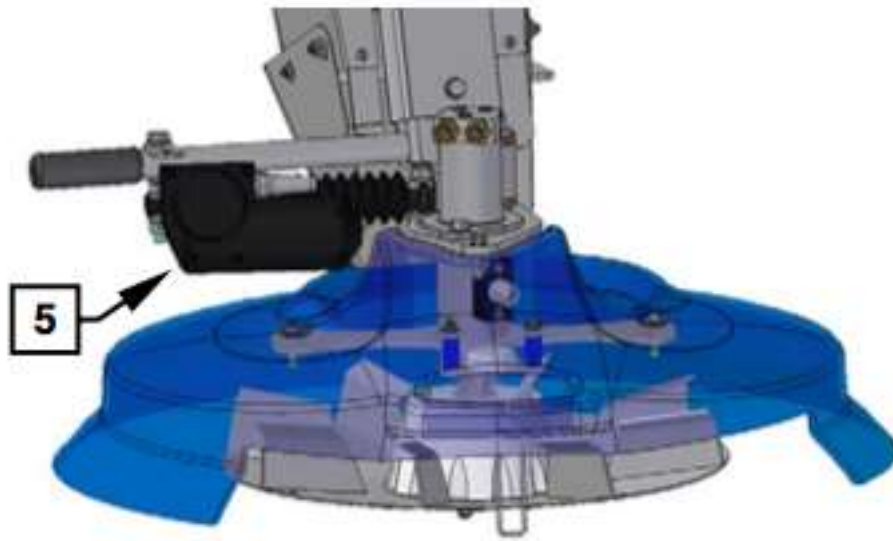


Kuva 13. Salo AM 3000 -sarjan hydraulikka. 1.-10. Hydrauliletkuja 11. Hydrauliventtiili 12. Kuljettimen hydraulimoottori 13. Pumpun hydraulimoottori 14. Lautasen hydraulimoottori 15. Pulssianturi PNP. (Arctic Machine 2011)

Kuvissa 14 ja 15 on esitetty levityslautanen päältä ja sivusta.



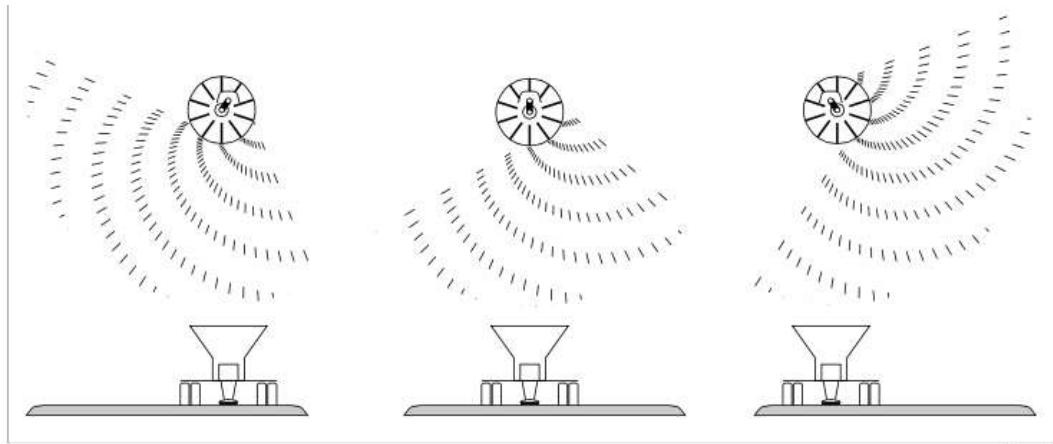
Kuva 14. Levityslautanen päältä kuvattuna. 1. Levityslautanen 2. Syöttökouru 3. Hydraulimoottori 4. Suojakansi 5. Kevenninjousi. (Nido 2005) (Muokannut JS)



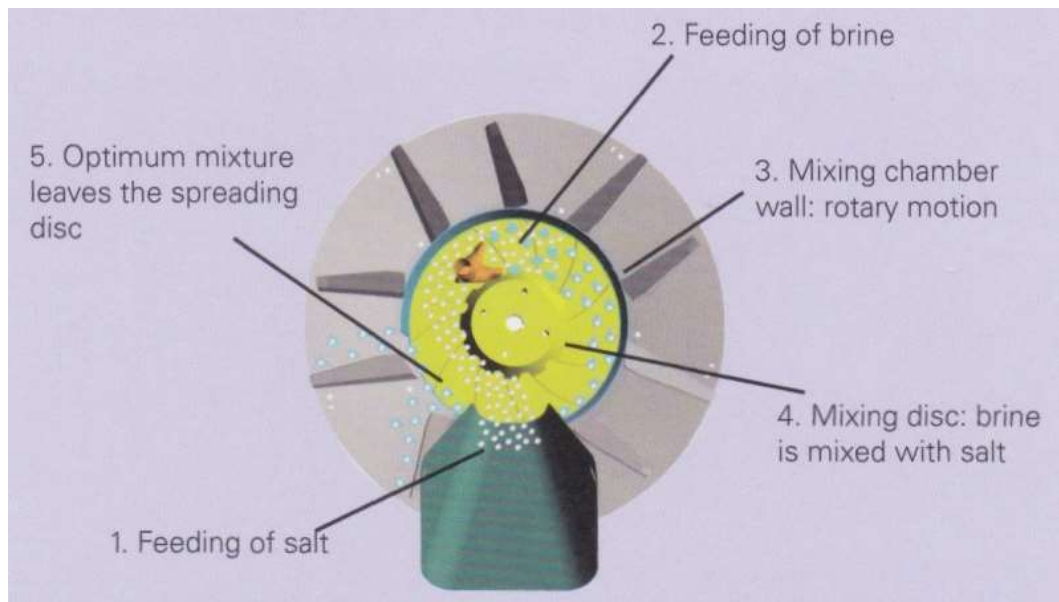
Kuva 15. Levityslautanen sivulta kuvattuna. 5. Lineaarinen säätömoottori. (Nido 2005)

Hydraulimoottorin käyttämä levityslautanen levittää syöttökourusta tulevaa materiaalia tasaisesti säädetylle levitysleveydelle. Levityslautasen korkeutta tienpinnan suhteen voidaan säätää syöttökourun pituutta muuttamalla auton lavakorkeuden mukaan. Levityskuviota säädellään lineaarisella säätömoottorilla. (Nido 2005, s.14.)

Siirtämällä levityslautasta syöttökourun suhteen saadaan säädettyä levityskuvio, sillä levitys kuvio riippuu siitä mihin kohtaan levitettävä materiaali putoaa levityslautaselle. Levityskuvio muuttuu levityslautasen mukana samaan suuntaan, kuten kuvassa 16 on esitetty. (Nido 2005, s.50.) Suolan kostutus levittimellä on esitetty kuvassa 17.

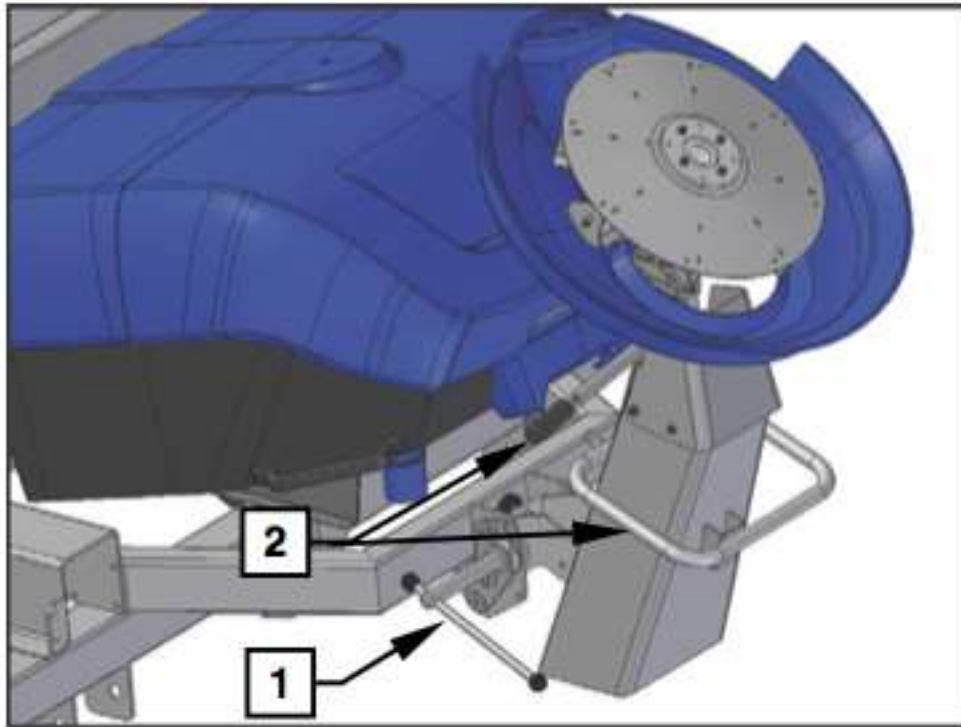


Kuva 16. Levityskuvion säätö kääntämällä lautasta (Nido 2005).



Kuva 17. Suolan kostutus levittimellä (Aebi Schmidt 2014).

Syöttökouru ja levitin voidaan nostaa kuljetuksen ajaksi, kuten kuvassa 18 esitetään. Kuvassa 14 esitetty kevenninjouset tekevät nostamisesta kevyempää.



Kuva 18. Yläasentoon nostettu syöttökouru. 1. Puristin 2. Syöttökourun kahvat. (Nido 2005)

Suolausautomaatin osista korroosiosta kärsivät pahiten peräpään osat, jotka ovat jatkuvasti suolan kanssa kosketuksissa. Kaikki suojaamattomat teräksiset osat syöpyvät herkästi, mutta erityisen alttiita korroosiolle ovat sijaintiensa ja materiaaliensa ansiosta levityslautasen kevenninjousi sekä lautasen pyöritys- ja säätömoottori.

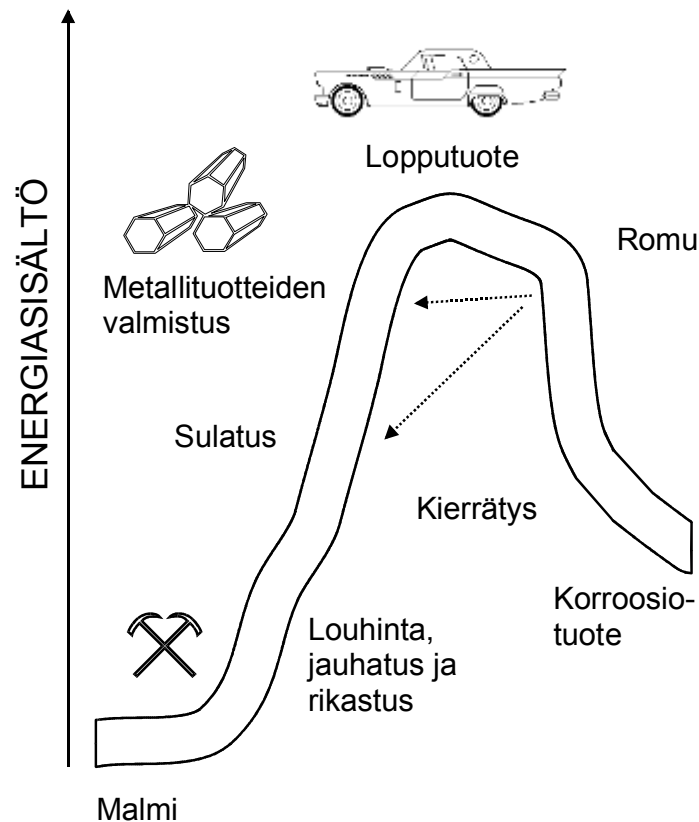
3 Korroosio ja korroosionesto

Yhdysvalloissa vuosina 1999-2001 tehdyn tutkimuksen mukaan suorat korroosiokustannukset olivat n. 276 miljardia dollaria eli n. 3.1 % bruttokansantuotteesta ja epäsuorat kustannukset ainakin yhtä suuret (Koch 2001, s.67). Lisäksi korroosio aiheuttaa työturvallisuusriskejä sekä ympäristön ja tuotteiden pilaantumista ja siksi sitä on tutkittu paljon. Korroosioon liittyvät tapahtumat ovat monimutkaisia, ja niiden ymmärtäminen sekä mahdollinen estäminen edellyttävät monen alan, kuten sähkökemian, kemian ja metallurgian, asiantuntemusta. (Antila 2005, s.175.) Korroosiosta aiheutuvia kustannuksia ei voida kokonaan eliminoida mitenkään, mutta tutkimukset osoittavat, että n. 25-30 % korroosion aiheuttamista vuotuisista kustannuksista olisi säästettävissä, mikäli käytettäisiin oikeanlaisia korroosionestomenetelmiä (Schmitt 2009, s.3). Tässä kappaleessa esitellään korroosion perusteet, korroosioympäristöt, sähkökemian korroosion takana, eri korroosion muotoja sekä menetelmät korroosion hallitsemiseksi. Tässä työssä keskitytään lähinnä metallien korroosioon. Materiaalivalintaa ei käsitellä tässä kappaleessa korroosioneston menetelmien yhteydessä, vaan sille on varattu oma kappale tässä työssä.

3.1 Korroosion perusteet

Korroosio tarkoittaa rakennemateriaalien syöpymistä ympäristön vaikutuksesta. Korroosioon liittyy aina kemiallisia tai sähkökemiallisia reaktioita ja joissain rakenteissa myös mekaanista rasitusta. Kemiallisen ja sähkökemiallisen korroosion välinen raja on häilyvä. Kemiallisessa korroosiossa tapahtuu kemiallisia hapettumis-pelkistymisreaktioita ja sillä tarkoitetaan yleensä kuivissa olosuhteissa ja korkeissa lämpötiloissa tapahtuvia syöpymisprosesseja. Sähkökemiallisessa korroosiossa reaktioiden luonne on sähkökemiallinen eli reagoivat yhdisteet eivät ole suorassa kosketuksessa toisiinsa. Suurin osa määssä ympäristössä tapahtuvista korroosioilmiöistä tulkitaan sähkökemiallisiksi, koska ne voidaan selittää sähkökemiallisin mallein. (Antila 2005, s.174.) Korroosio on materiaalien eräs yleisimmistä ja merkittävimmistä tuhoutumismekanismeista. Korroosio on luonnollinen tapahtuma, jossa materiaali pyrkii palaamaan

energeettisesti edullisimpaan olomuotoonsa. Materiaaliin varastoituu energiaa tuotteen valmistuksen yhteydessä ja korroosiotapahtumassa kyseinen energia vapautuu, jonka seurauksena esimerkiksi metalli muuttuu takaisin malmia muistuttavaan olomuotoon eli oksidiksi, sulfidiksi tai muuksi yhdisteeksi. (Aromaa 2012, s.5.) Energian varastoituminen materiaaliin ja energian vapautuminen materiaalista korroosiotapahtumassa on esitetty kuvassa 19.



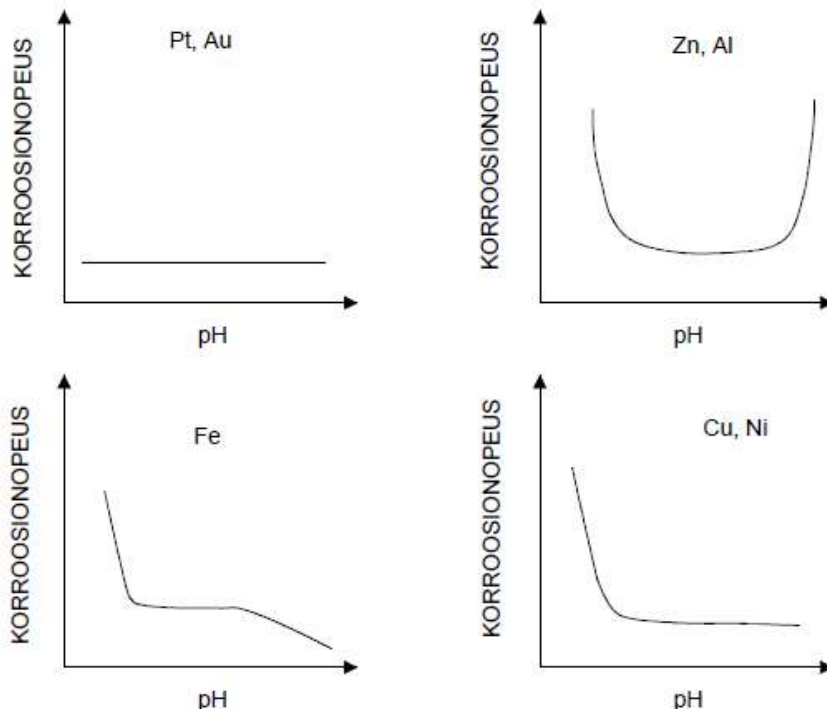
Kuva 19. Metallien energiatilan muuttuminen elinkaarensa eri vaiheissa (Aromaa 2014).

3.1.1 Korroosioympäristöt

Ilmastorasituksessa, veden aiheuttamassa korroosiossa ja maaperärasituksessa korroosion perusilmiöt ovat samat. Sen sijaan katodisen reaktion, anodisen liukenemisreaktion sekä korroosiotuotteiden muodostumisreaktioiden luonne ja nopeus muuttuvat ympäristöstä riippuen. (Aromaa 2012, s.16.)

Tärkeimmät ympäristön syövyttävyyteen vaikuttavat liuosmuuttujat ovat (Aromaa 2012, s.20-25.):

- Liuotin (vesi, orgaaninen yhdiste tai niiden seos).
- pH vaikuttaa sekä reaktionopeuksiin että passivoitumiseen. Kuvassa 20 on esitetty eri metallien korroosionopeuksia happamuuden muuttuessa.
- Redox-potentiaali eli liuoksen kyky hapettaa vaikuttaa sekä reaktionopeuksiin että passivoitumiseen. Mitä korkeampi redox-potentiaali on, sitä todennäköisempää korroosio on.
- Lämpötila vaikuttaa reaktionopeuksiin. 10-30 °C:n lämpötilannousu kaksinkertaistaa reaktionopeuden ja alle -20 °C:ssa korroosio pysähtyy.
- Liuenneet suolat vaikuttavat reaktiotuotekerrosten muodostumiseen ja tuhoutumiseen. Useimmissa tapauksissa liuenneiden suolojen vaikutus perustuu johtokyvyn muuttumiseen.
- Liuoksen virtaus vaikuttaa reaktionopeuksiin ja reaktiotuotekerrosten pysyvyyteen. Virtaus tai sen puuttuminen muuttaa myös liuoksen koostumusta paikallisesti.



Kuva 20. Skemaattinen esitys eri metallien korroosionopeuden muutoksesta happamuuden muuttuessa (Aromaa 2012).

Ilmastorasituksen aikana pinnan märkänäoloaika on eniten korroosionopeuteen vaikuttava tekijä. Kolme kerrosta vesimolekyylejä riittää korroosioon ja metalleilla kriittisen suhteellisen kosteuden yläpuolella muodostuu kyseinen kolmen kerroksen paksuinen vesifilmi ja korroosionopeus kasvaa voimakkaasti. (Leygraf 1995, s.421-455.) Metalleille kriittinen suhteellisen kosteuden arvo on noin 60 %. Kriittisen suhteellisen kosteuden arvo riippuu materiaalista ja pinnalla olevista epäpuhtauksista. Lämpötila vaikuttaa märkänäoloaikaan, korroosioreaktioiden kinetiikkaan, suhteelliseen kosteuden arvoon ja kastepisteeseen (AWWA 2014, s.69). Kaasumaiset ja kiinteät epäpuhtaudet päätyvät kosteuden lisäksi ilmasta metallin pinnalle. Metallien korroosion kannalta tärkeimmät ilman epäpuhtaudet ovat rikkiyhdisteet ja kloridit. (Aromaa 2012, s.23.) Pinnan sijainti vaikuttaa märkänäoloaikaan, sillä tuulelta ja auringon säteilyltä suojattu pinta pysyy kauemmin märkänä. Toisaalta tuuli tuo epäpuhtauksia pinnalle ja auringon säteily vahingoittaa metallin pinnoitetta. Suojatut pinnat kärsivät vähemmän korroosiota kuin suojaamattomat, jos pystytään huolehtimaan pinnan kuivana pysymisestä. Kosteutta pääsee suojattuihin rakenteisiin tiivisteiden läpi diffuusion välityksellä sekä kondensaation seurauksena. Alaspäin olevat pinnat kärsivät korroosiota ylöspäinsuunnattuja pintoja enemmän kondensaation takia. (AWWA 2014, s.69.) Ilmastollinen korroosiokäyttäytyminen on jaettu kolmeen tyyppiin korroosiossa muodostuvien suojakerrosten mukaan. Kromityyppiin kuuluvat kaikki kromia sisältävät seokset, alumiini ja lyijy. Suojakalvon muodostuttua korroosio lakkaa näillä metalleilla. Kuparityyppiin kuuluvat kuparimetallit ja niillä korroosio hidastuu ajan kuluessa suojakalvon tullessa paksummaksi. Sinkkityyppiin kuuluu sinkin lisäksi magnesium ja nikkeli. Näillä metalleilla korroosion tapahtuu vakionopeudelle, koska suojaavakalvoa ei muodostu. Maaseutuilmastossa teräksen korroosio on kuparityyppiä, mutta meri- ja teollisuusilmastossa sinkkityyppiä. Meri-ilmastossa sinkin korroosio on kuparityyppiä. (Aromaa 2012, s.25.) Taulukossa 9 on esitelty eri korroosionopeuksia eri metalleille eri ilmastoissa.

Taulukko 9. Yleisen korroosion korroosionopeuksia eri metalleilla erilaisissa ilmastorasituksissa (AWWA 2014).

	Maaseutu	Kaupunki	Teollinen	Meri
Hiiliteräs	4-65	23-71	26-175	26-104
Säänkestävä teräs	5-27		4-68	7-85
Ruostumaton teräs (300-sarja)		0,002-0,01	0-0,02 1,27-	<0,03-0,03
Kupari	0,35-0,51		3,05	0,15-0,6
Galvanoitu teräs	0,2-3	2-16	2-16	0,5-0,6
Alumiini	0,01	1	0,8-13	0,4-0,6
Korroosionopeudet um/vuosi				

Korroosio vedessä eroaa korroosiosta ilmassa, sillä vedessä liuennutta happea on rajoitetusti ja korroosio vedessä riippuukin siitä nopeudesta, jolla happea kulkeutuu metallin pinnalle. Korroosiotuotteet eivät myöskään hapetu niin pitkälle kuin ilmassa ja korroosiotuotteet ovat usein huokoisia ja irrallisia. Veden kovuus, pH ja liuenneen hiilidioksidin muodostama kalkkitasapaino on veden syövyttävyyden määräävä tekijä. Meriveden syövyttävyyteen vaikuttaa ensi sijassa suolapitoisuus, lämpötila, happipitoisuus, erilaiset epäpuhtaudet, virtausnopeus sekä biologinen aktiivisuus. (Aromaa 2012, s.26-30.) Veteen liuennut happi ja erityisesti happipitoisuuserot aiheuttavat lähes aina metallien korroosion maaperässä (Aromaa 2012, s.34).

3.1.2 Sähkökemiallinen reaktio

Metalleille korroosio on normaalisti sähkökemiallista korroosiota. Sähkökemialliset reaktiot jaetaan kahteen tyyppiin. Anodisessa reaktiossa vapautuu elektroneja ja katodisessa reaktiossa kuluu elektroneja. (Callister 2007, s.624.) Jokainen sähkökemiallinen reaktio saadaan ulkoisen virtalähteen avulla ajettua joko anodiseen tai katodiseen suuntaan (Aromaa 2012, s.37). Hapettuminen tapahtuu anodilla ja hapettumista kutsutaan anodiseksi reaktioksi. Epämetalli tai liuoksessa esiintyvä metalli-ioni vastaanottaa hapettumisessa syntyneet elektronit, jolloin puhutaan pelkistymisestä. Pelkistyminen tapahtuu katodilla ja sitä kutsutaan katodiseksi reaktioksi. Sähkökemiallisen kokonaisreaktio on anodisen reaktion ja katodisen reaktion summa ja se koostuu

vähintään yhdestä anodisesta ja yhdestä katodisesta reaktiosta. Hapettumisen ja pelkistymisen tulee olla tasapainossa eli kaikki hapettumisessa syntyneet elektronit kuluvat pelkistymisessä. (Callister 2007, s.623-624.)

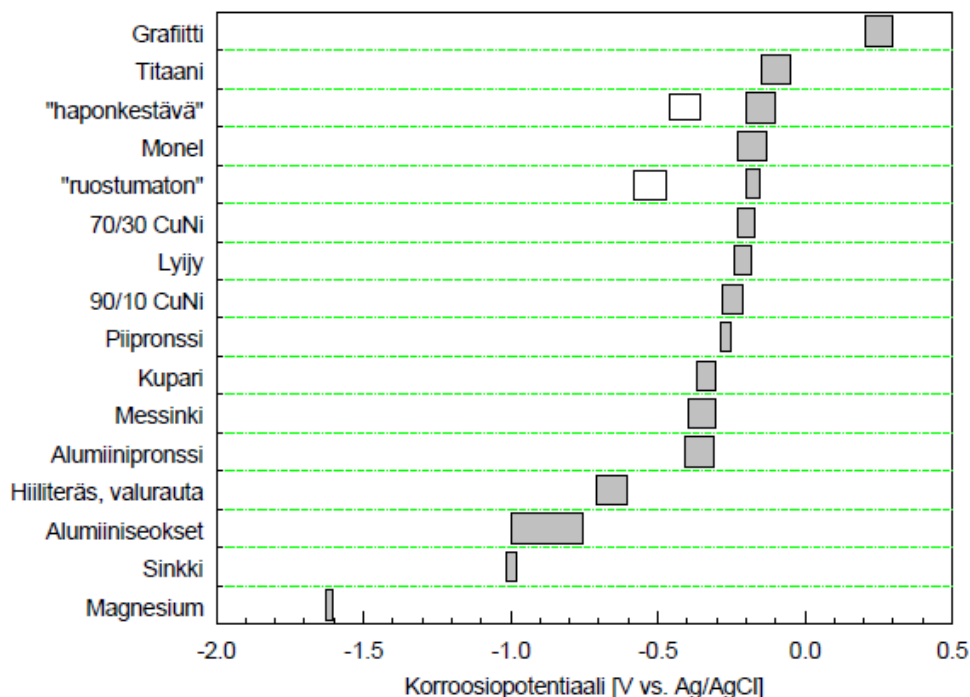
Sähkökemialliselle reaktiolle voidaan laskea termodynamiikan perusteella tasapainotila, jota kuvaa standardielektrodipotentiaali E^0 . Tällöin esimerkiksi puhdas metalli on tasapainossa liuoksen kanssa, joka sisältää saman metallin ioneja. Mitään kokonaismuutosta ei havaita, sillä yksi ja sama reaktio etenee vastakkaisiin suuntiin yhtä suurilla nopeuksilla eli systeemissä vallitsee dynaaminen tasapainotilanne. Standardielektrodipotentiaali lasketaan standarditilassa, jossa paine on 100 kPa, lämpötila on 25 °C ja reagoivien aineiden aktiivisuus on yksi. Vedynekehitysreaktion standardipotentiaaliksi on sovittu 0 V ja kaikkia muita reaktioita verrataan siihen. Mikäli systeemi ei ole standarditilassa, puhutaan tasapainopotentiaalista, jossa on myös kyse yhdestä vastakkaisiin suuntiin etenevästä reaktiosta. Tasapainopotentiaalın arvot lasketaan Nernstin yhtälön avulla. (Aromaa 2012, s.37-38.)

Anodiset reaktiot voivat tapahtua vain tasapainopotentiaaliaan korkeammissa potentiaaleissa ja katodiset reaktiot voivat tapahtua ainoastaan tasapainopotentiaaliaan matalammissa potentiaaleissa. Mitä korkeampi on sähkökemiallisen reaktion tasapainopotentiaali, sitä todennäköisemmin se alkaa edetä katodiseen suuntaan, ja mitä matalampi tasapainopotentiaali on, sitä todennäköisemmin reaktio etenee anodiseen suuntaan. Metallin on sitä jalompi mitä korkeampi on sen tasapainopotentiaali. Tasapainopotentiaalın arvot taulukoidaan sähkökemiallisiksi sarjoiksi, kuten taulukossa 10 on esitetty. Tasapainopotentiaalın arvot ovat kuitenkin teoreettisia ja todellisia mitattuja potentiaaleja käsiteltäessä puhutaan galvaanisesta sarjasta, joka on esitetty kuvassa 21. Galvaanisessa sarjassa polarisaatioilmiöt yleensä pienentävät metallien välisiä potentiaalieroja ja metallien pinnalle muodostuvat reaktiotuotekerrokset sekä passiivikalvot muuttavat paikoitellen järjestystä verrattuna teoreettiseen sähkökemialliseen sarjaan. Sähkökemiallisia ja

galvaanisia sarjoja käytetään reaktioiden todennäköisyyksiä arvioitaessa. (Aromaa 2012, s.38-40.)

Taulukko 10. Sähkökemiallinen sarja (Aromaa 2012).

Metalli/metalli-ioni -tasapaino	E^0 vs. H_2/H^+ [V]	
Au/Au ³⁺	1.498	Jalot
Pt/Pt ²⁺	1.2	
Pd/Pd ²⁺	0.987	
Ag/Ag ⁺	0.799	
Hg/Hg ²⁺	0.788	
Cu/Cu ²⁺	0.337	
H ₂ /H ⁺	0	
Pb/Pb ²⁺	-0.126	
Sn/Sn ²⁺	-0.136	
Ni/Ni ²⁺	-0.25	
Co/Co ²⁺	-0.277	
Fe/Fe ²⁺	-0.44	
Cr/Cr ²⁺	-0.744	
Zn/Zn ²⁺	-0.763	
Al/Al ³⁺	-1.662	
Mg/Mg ²⁺	-2.363	
Na/Na ⁺	-2.714	
K/K ⁺	-2.925	Epäjalot



Kuva 21. Galvaaninen sarja merivedessä. Haponkestävän ja ruostumattoman teräksen kohdalla vaalea alue viittaa aktiivitilaan ja tumma alue passiivitilaan. (Aromaa 2012)

Galvaaninen sarja voi johtaa harhaan, jos sitä ei osata lukea. Ruostumaton teräs voi esiintyä sekä aktiivi- että passiivitilassa, kuten kuvassa 21 näkyy ja tämän lisäksi pienetkin muutokset käyttöolosuhteissa tai metallissa itsessään voi muuttaa metallien paikkaa galvaanisessa sarjassa. (Davis 2000, s.128.)

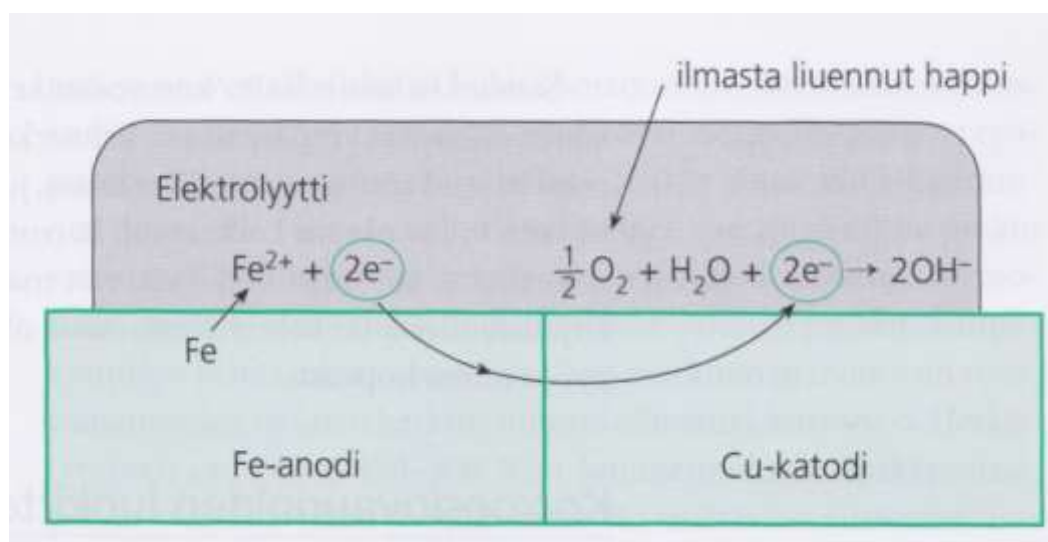
3.1.3 Sekapotentialiteoria

Sähkökemiallinen korroosio voidaan ajatella usean mikroskooppisen pienen sähköparin eli paikallisparin muodostamaksi prosessiksi, jossa on samat peruselementit kuin sähkökemiallisissa kennoissa. Jotta korroosio voi edetä, vaaditaan kaikki elementit:

- Elektrodit ja reaktiot
- Elektrolyytti
- Johdin

Korroosiopari muodostuu kahden eri potentiaalissa olevan metalliosan välille. Kyseessä voi olla saman metallipinnan kaksi erilaista potentiaalialuetta tai kaksi eri metallia, jotka ovat toisiinsa sähköisessä kosketuksessa, kuten kuvassa 22 on

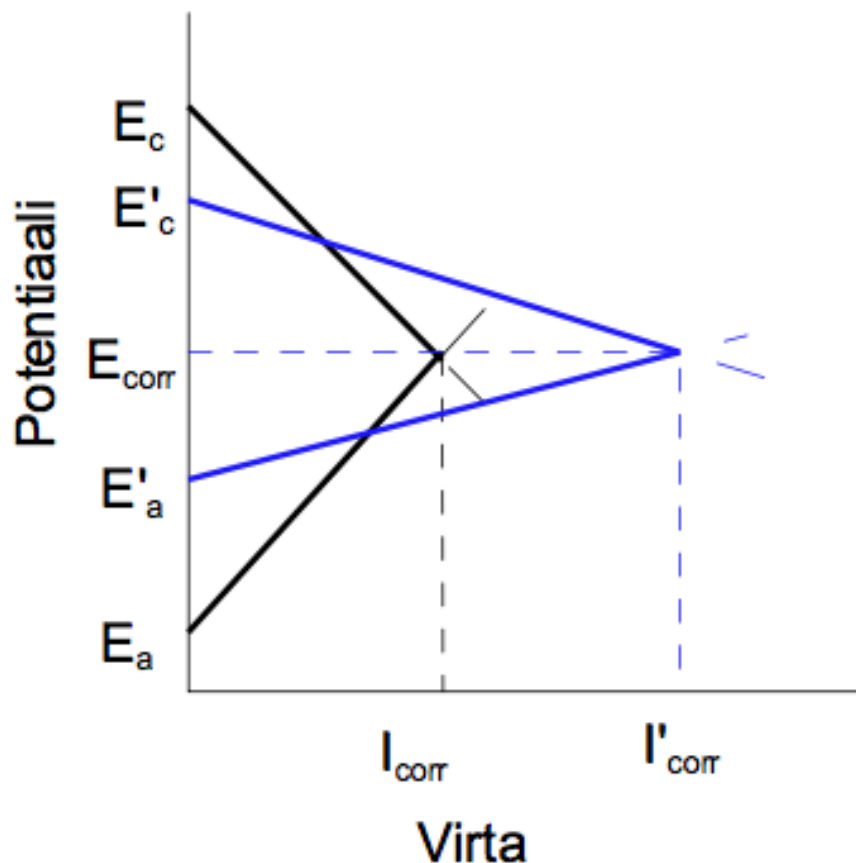
esitetty. Erilaiset epäpuhtaudet, jännitykset ja kidevirheet aiheuttavat elektronien epätasaista jakautumista metallin pinnalla, mikä mahdollistaa metallin pinnalle muodostuvat erilaiset potentiaali-alueet. Myös jos metalli-ionien tai jonkin muun potentiaaliin vaikuttavan aineen konsentraatio liuoksessa on erilainen pinnan eri kohdissa, on eri kohdilla eri potentiaali. Korkeammassa potentiaalissa olevasta kohdasta tulee korroosioparin katodi ja matalammassa potentiaalissa olevasta kohdasta anodi, kuten kuvassa 22 on esitetty. Tyypillisessä korroosiotapauksessa anodi- ja katodialueet ovat lähellä toisiaan, mutta korroosiopari voi muodostua myös toisistaan hyvinkin etäälle, jopa satojen metrien päässä olevien metallikohtien välille (esim. tankkerin pronssipotkurin aiheuttama laivan rungon vedenalaisten osien syöpyminen). (Antila 2005, s.174-175.)



Kuva 22. Korroosiopari muodostaa suljetun virtapiirin. Anodilla tapahtuu hapetusreaktio ja hapettuneet aineet siirtyvät liuokseen. Katodilla hapetin siirtyy liuoksesta elektrodin pinnalle ja tapahtuu pelkistysreaktio sekä pelkistyneiden aineiden siirtyminen pinnalta liuokseen. (Antila 2005)

Reaktionopeudet eivät ole aina merkittäviä, vaikka sähkökemiallisen liukenemisen edellytykset olisivatkin olemassa. Korroosion termodynaamisena ajavana voimana on anodi- ja katodireaktion välinen potentiaaliero, mutta sähkökemiallisten reaktioiden nopeudet riippuvat polarisaatioilmiöistä ja korroosiotilanteessa elektrodit ovat polarisoituneet. Periaatteessa reaktio etenee sitä nopeammin, mitä suurempi on poikkeama tasapainotilanteesta ja korroosionopeus riippuu siitä, miten voimakkaasti elektrodit polarisoituvat. Voimakkaammin polarisoituva reaktio kontrolloi korroosiota ja se voidaan

joissain tapauksissa tunnistaa potentiaalimittauksilla ja Evansin diagrammien avulla. Evansin diagrammi on polarisaatiokäyrän yksinkertaistettu versio, jossa anodinen ja katodinen reaktio piirretään suorina lineaarisella asteikolla. Reaktioita kuvaavat suorat leikkaavat jossakin pisteessä, joka kuvaa korroosiopotentiaalia E_{corr} ja korroosiovirtaa I_{corr} . Korroosiokennon periaatteen mukaan korroosiota voidaan hidastaa suljetussa virtapiirissä millä tahansa tekijällä, joka hidastaa jommankumman reaktion nopeutta tai kasvattaa kennon vastustusta. Korroosiopotentiaalista ei voida päätellä korroosionopeutta, sillä kineettiset tekijät määräävät reaktionopeuden, kuten kuvassa 23 on esitetty. (Aromaa 2012, s.52-54.)



Kuva 23. Evansin diagrammi, jossa näkyy ajavan voiman (potentiaaliero) ja reaktiokinetiikan (polarisoituminen) vaikutus. Systeemin E_c - E_a ajava voima on suurempi, mutta systeemi E'_c - E'_a polarisoituu hitaammin, joten sen reaktionopeudet ovat suuremmat. Systeemit asettuvat samaan korroosiopotentiaaliin, mutta reagoivat eri nopeuksilla. (Aromaa 2012)

3.1.4 Passivoituminen

Passivoitumisella tarkoitetaan metallin kykyä muodostaa pinnalleen suojaava ja itsensä korjaava reaktiotuotekerros, jolloin syöpymisnopeus on erittäin pieni ja muuttumaton elektrodin potentiaalin vaihdellessa tietyissä rajoissa. Teräkset, alumiini ja titaani ovat tyypillisiä passivoituvia metalleja. (Aromaa 2012, s.55.)

Aktiiviset metallit syöpyvät tavallisesti yleisen korroosion mekanismilla, jolloin oheneminen on kutakuinkin tasaista. Passivoituvilla metalleilla yleisen korroosion nopeus laskee tavallisesti oksidisen reaktiotuotekerroksen ansiosta, mutta passiivitilassa saattaa esiintyä paikallista korroosiota, joka on yleistä korroosiota vaarallisempaa. Metallin mahdollisimman helppo passivoituminen ja sen mahdollisimman pieni liukenemisnopeus passiivitilassa ovat korroosionkestävyyden kannalta edullisia tekijöitä. Passivoitumiseen voidaan vaikuttaa seostamalla ja esimerkiksi kromin, nikkelin tai molybdeenin seostaminen ruostumattomaan teräkseen parantaa passivoitumiseen ja korroosionkestävyyteen liittyviä arvoja. (Aromaa 2012, s.56-58.)

3.2 Korroosionmuodot

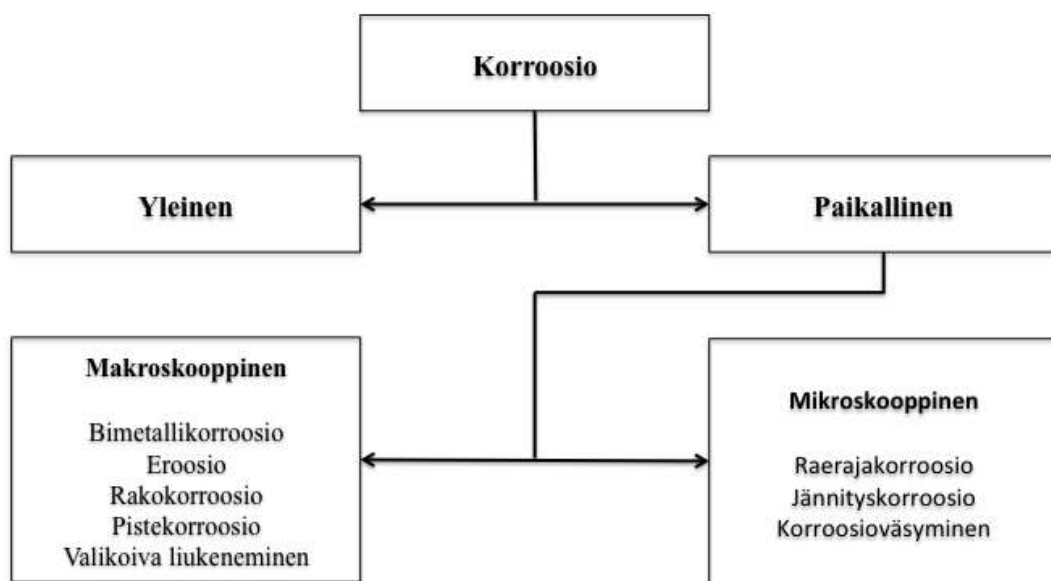
Korroosiota esiintyy useassa muodossa ja korroosionmuotojen erottelu toisistaan sekä niiden lukumäärä vaihtelee eri lähdeteoksissa. Fontana ja Greene esittelivät 1960-luvulla kahdeksan korroosionmuotoa, "The eight forms of corrosion", joka on edelleen pätevä ja johon yleisesti viitataan. (Aromaa 2012, s.61.) Nämä kahdeksan korroosionmuotoa on esitetty taulukossa 12.

Taulukko 12. Korroosionmuotoja (Fontana 1987).

The eight forms of corrosion
Yleinen korroosio, Tasainen korroosio
Galvaaninen korroosion, Bimetallikorroosio
Pistekorroosio
Rakokorroosio
Valikoiva liukeneminen
Raerajakorroosio
Eroosiokorroosio
Jännityskorroosio(murtuma)

Standardissa SFS-ISO 8044 esitellään yllä mainittujen kahdeksan korroosiomuodon lisäksi useita eri korroosiomuotoa. Näitä korroosiomuotoja ovat muun muassa saostumakorroosio, kerroskorroosio, hitsikorroosio, korroosioväsyminen ja kavitaatiokorroosio. (SFS-ISO 8044, s.14-16.)

Korroosiota on sekä yleistä että paikallista korroosiota, joista paikallinen korroosio aiheuttaa vakavampia ongelmia. Yleisessä korroosiossa sähkökemialliset reaktiot tapahtuvat tasaisesti koko metallin pinnalla, kun taas paikallinen korroosio on keskittynyt vain pienelle alueelle aiheuttaen usein odottamattomia vaurioita. Paikallinen korroosio jaetaan makroskooppisiin ja mikroskooppisiin muotoihin sen perusteella voiko vauriot erottaa paljaalla silmällä. Korroosiomuotoja voidaan tarkastella myös mekaanisten tekijöiden ja korroosion yhteisvaikutuksen pohjalta. Kuvassa 24 on esitetty korroosiomuotojen jaottelu esiintymispaikan perusteella. (Aromaa 2012, s.62.)



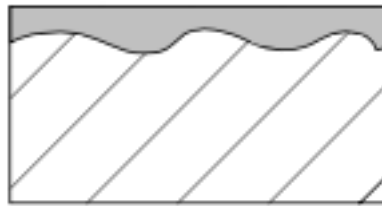
Kuva 24. Korroosiomuotojen jaottelu esiintymispaikan perusteella (Aromaa 2012).

Huomioitavaa on, että vaikka korroosiomuotojen jaottelu on hyödyllistä, niin se on keinotekoisia eikä missään nimessä täydellistä. Monet korroosio-ongelmat johtuvat useiden samanaikaisten korroosiomuotojen yhteisvaikutuksella, esimerkiksi pistekorroosio on voinut saada alkunsa kavitaatiosta. Jotkin

korroosimuodoista on erittäin vaikea tunnistaa, sillä esimerkiksi saostumakorrosio on pistekorrosion ja galvaanisen korrosion yhdistelmä. Kaikesta huolimatta korroosimuotojen jaottelu auttaa ymmärtämään monimutkaista systeemiä pilkkomalla sen pienempiin ja ymmärrettävimpiin osiin. Korroosimuotojen jaottelu on erityisen hyödyllistä vaurioanalyysissä. (Davis 2000, s.100.)

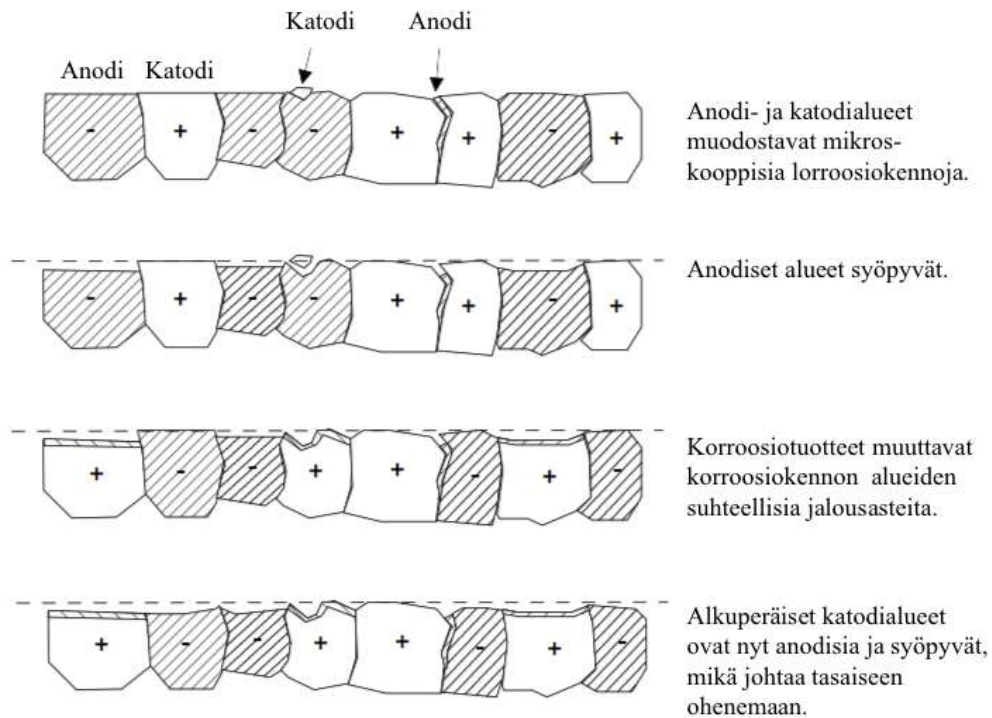
3.2.1 Yleinen korrosio

Yleinen korrosio eli tasainen korrosio on tavallisin korroosiotyyppi ja se on tyypillinen ilmasto-olosuhteissa tapahtuvan korrosion muoto useimmilla suojaamattomilla metallipinnoilla. Materiaali syöpyy näennäisesti koko pinnaltaan samalla nopeudella, koska anodiset ja katodiset reaktiot tapahtuvat samalla pinnalla, kuten kuvassa 25 on esitetty. (Aromaa 2012, s.63.)



Kuva 25. Yleinen korrosio, jossa hapetin kulkeutuu tasaisesti koko pinnalle ja koko pinta syöpyy samalla nopeudella (Aromaa 2012).

Korroosio ei kuitenkaan ole mikroskooppisesti tarkasteltuna aivan tasaista, sillä vain pinnan anodialueet syöpyvät, kuten kuvassa 26 on esitetty. Pinnalle syntyy paikallisia mikroskooppisia korroosiokennoja rakeiden välisten potentiaalierojen vuoksi. (Aromaa 2012, s.64.)



Kuva 26. Korroosiokennon avulla tarkasteltu yleinen korroosio (Aromaa 2012).

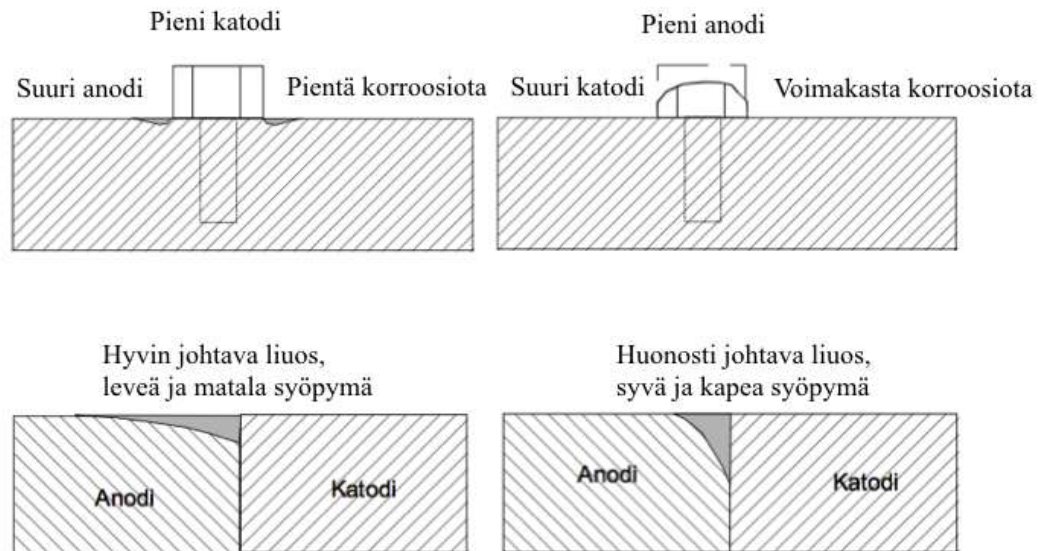
Suunnittelijan kannalta yleinen korroosio ei ole erityisen hankala ratkaistava. Yleistä korroosiota voidaan estää mm. seuraavin keinoin (Aromaa 2012, s.64-65.):

- Käytetään kestävämpää materiaalia, esim. vaihdetaan rakenneteräs ruostumattomaan teräkseen.
- Pinnoittamalla, esim. maalataan pinta.
- Liuosympäristön muuttaminen vähemmän syövyttäväksi, esim. pH:n säätö.
- Sähköinen suojausmenetelmä, esim. anodinen suojaus.

3.2.2 Galvaaninen korroosio / Bimetallikorroosio

Nykyinen standardien mukainen termi galvaaniselle korroosiolle on bimetallikorroosio. Bimetallisessa korroosiossa kaksi tai useampia metalleja on kytketty toisiinsa sähköisesti ja upotettu samaan elektrolyyttiin. Epäjalompi metalli muodostuu anodiksi ja syöpyy, kun taas jalommasta metallista muodostuu katodi ja syöpyminen hidastuu tai loppuu kokonaan. Bimetallikorroosio on sitä todennäköisempää, mitä suurempi on metallien välinen jalousaste-ero. Anodisten ja katodisten virtojen on oltava yhtä suuria korroosiokennossa, joten pieni

anodipinta-ala johtaa suureen anodiseen virrantiheyteen, kuten kuvassa 27 on esitetty (Aromaa 2012, s.65.)



Kuva 27. Galvaaninen korroosio. Pieni anodi ja suuri katodi keskittävät korroosion pienelle alueelle, jossa syöpyminen on voimakasta. Huonosti johtavassa liuoksessa korroosio keskittyy pienemmälle alueelle verrattuna hyvin johtavaan liuokseen. (Aromaa 2012) (Muokannut JS)

Bimetallikorroosion alue ei käsitä koko rakenteen pintaa, vaan se rajoittuu metallien liitoskohdan lähelle ja elektrolyytin liuoksen johtokyky vaikuttaa siihen kuinka laajalla alueella korroosio tapahtuu. (Aromaa 2012, s.65.)

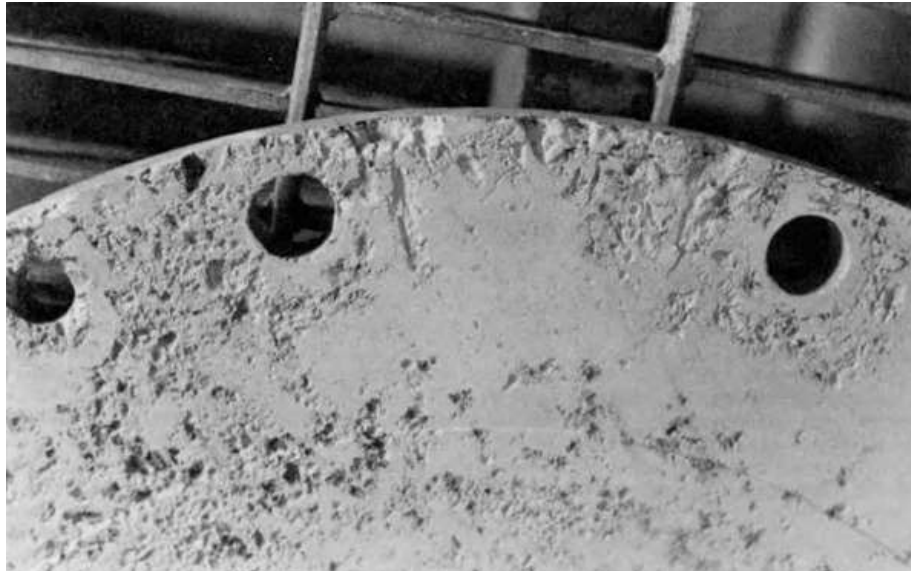
Bimetallikorroosion välttämiseksi on valittava metallit, jotka kyseisessä ympäristössä ovat galvaanisessa sarjassa mahdollisimman lähellä toisiaan tai sähköisesti eristettävä metallit toisistaan. Huomioitavaa on, että materiaalien välinen potentiaaliero ei ole verrannollinen korroosionopeuteen, sillä mitä voimakkaammin materiaalit polarisoituvat, sitä enemmän galvaanista korroosiota ajavaa potentiaaliero kuluu. (Aromaa 2012, s.67.) Tämän takia tulee olla tietoa materiaalien polarisaatiokäyttäytymisestä, jotta galvaanisen korroosion vaikutusta voidaan arvioida luotettavasti. Esimerkiksi erittäin jalon titaani yhdistäminen vähemmän jaloihin metalleihin merivedessä johtaa arvioitua pienempään galvaaniseen korroosioon tai ei korroosioon ollenkaan. Tämä johtuu siitä, että titaani polarisoituu helposti ja nopeasti merivedessä, näin vähentäen

korroosionopeutta. (Davis 2000, s.129.) Myös nesteen virtausnopeus vaikuttaa polarisaatioilmiön kautta galvaaniseen korroosioon. Esimerkiksi merivedessä pienillä virtausnopeuksilla teräs liitettynä ruostumattomaan teräkseen, kupariin, nikkeliin tai titaaniin ei aiheuta merkittävää galvaanista korroosiota. Suuremmilla nopeuksilla teräksen galvaaninen korroosio pienenee entisestään, kun teräs on liitettynä ruostumattomaan teräkseen tai titaaniin, sillä ruostumattoman teräksen ja titaanin katodinen polarisaatio on helpompaa suuremmilla virtausnopeuksilla. (Davis 2000, s.142.)

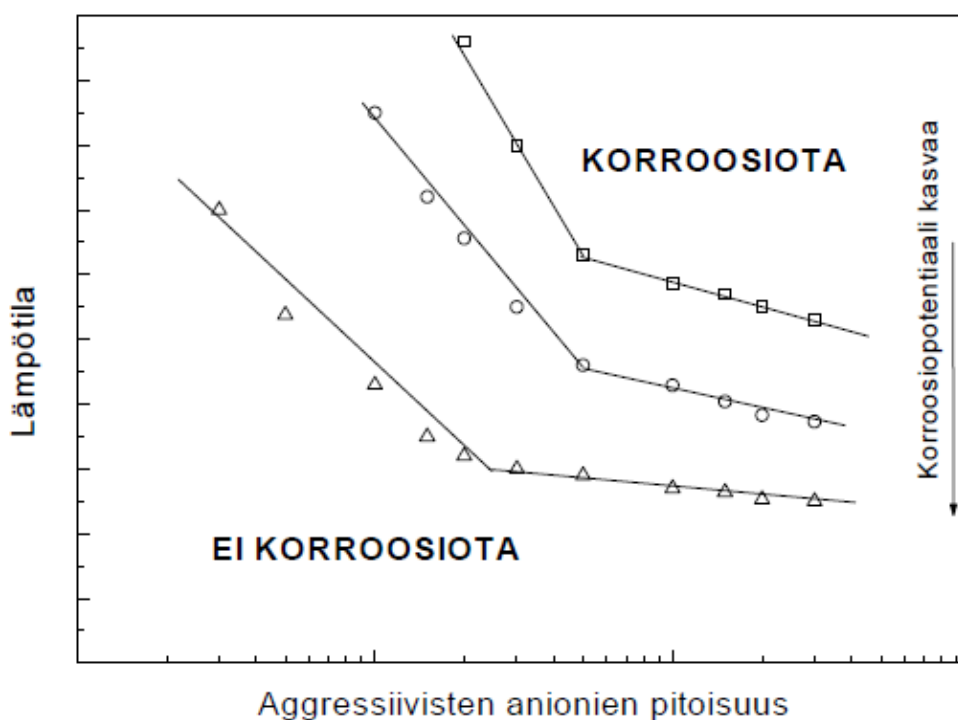
Bimetallikorroosiota voidaan vähentää pienentämällä systeemin katodista pintaa eli esimerkiksi teräksen ja ruostumattoman teräksen liitoksessa on maalattava molemmat metallit tai vain ruostumaton teräs, sillä vain tavallisen teräksen maalaaminen saattaa johtaa entistä voimakkaampaan bimetallikorroosioon, jos maaliin tulee vaurioita. (Aromaa 2012, s.67.)

3.2.3 Piste- ja rakokorroosio

Pistekorroosiossa metallin syöpyminen keskittyy pienille alueille metallin pinnassa, kuten kuvassa 28 on esitetty. Se alkaa passiivikalvon paikallisista virheistä tai tavallista syövyttävämmässä ympäristössä. Pistekorroosio on autokatalyyttinen prosessi, joka saa alkunsa erilaisista pinnan heterogeenisuuksista, pintakuvioista, pintakalvojen rakennevirheistä tai esimerkiksi liuoksen voimakkaasta törmäyksestä pintaan. Pistekorroosiolle on välttämätöntä aggressiivisten ionien pitoisuuden, lämpötilan sekä tietyn anodisen potentiaalin ylittyminen, kuten kuvassa 29 on esitetty. (Aromaa 2012, s.70-71.)



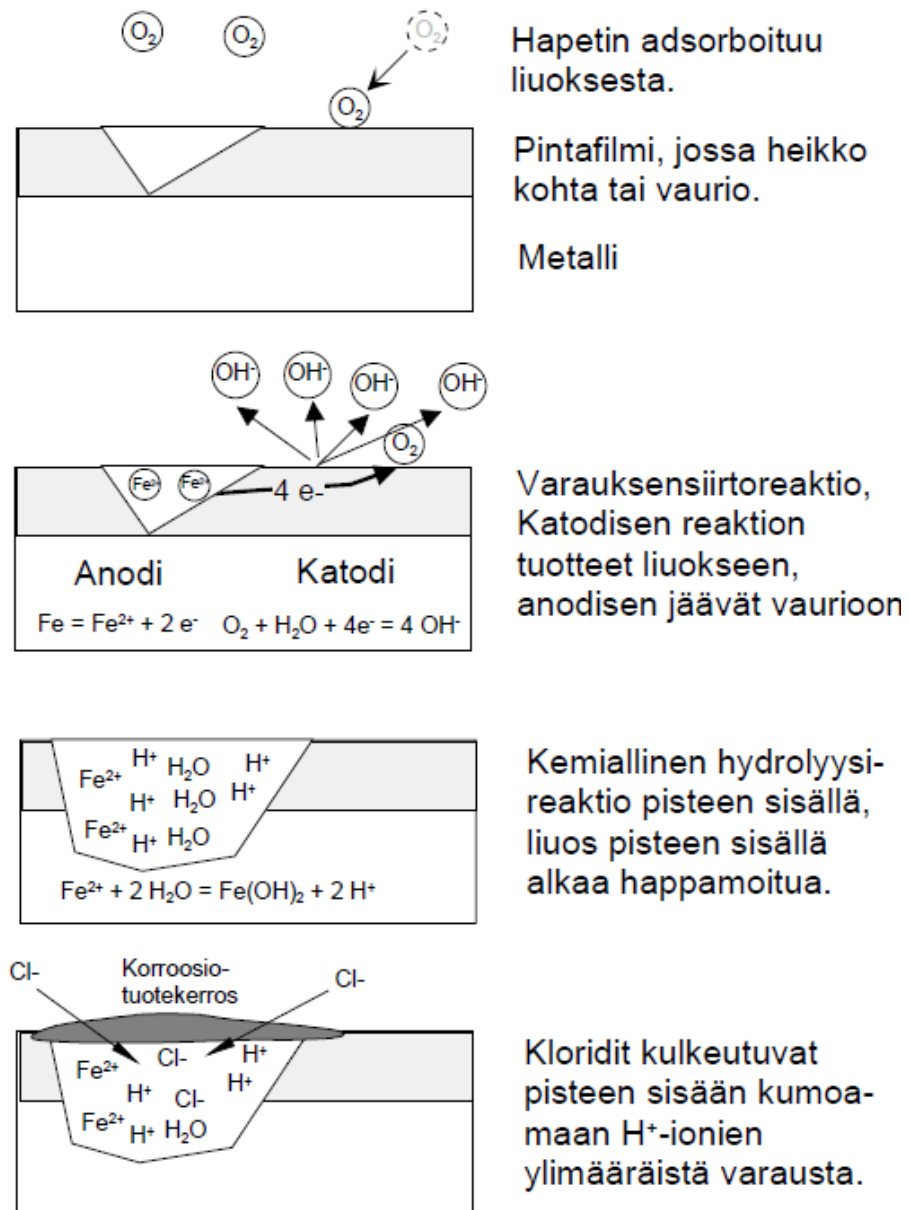
Kuva 28. Ruostumattoman teräksen (316) pistekorroosiota CaCl_2 liuoksessa (Davis 2000).



Kuva 29. Liuosmuuttujien periaatteellinen vaikutus ruostumattomien terästen pistekorroosioon (Aromaa 2012).

Pistekorroosion alkuvaihe perustuu pistesyöpymien ydintymiseen ja uudelleen passivoitumiseen. Ydintyneen pisteen kasvaessa metalli liukenee ja alueelle muodostuu ylimääräinen positiivinen varaus vapaiden H^+ -ionien johdosta, mikä johtaa liuoksen negatiivisten ionien, kuten Cl^- -ionien, kulkeutumiseen pisteen

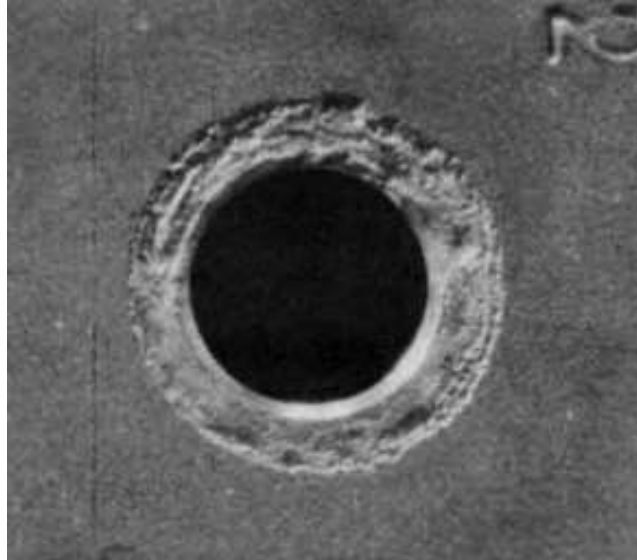
sisälle sähkökemiallisen tasapainon saavuttamiseksi. Pisteessä muodostuu lopulta hyvin väkevä ja hapan metallikloridiliuos. (Aromaa 2012, s.71.) Kuvassa 30 on esitetty pistekorroosion autokatalyyttinen prosessi.



Kuva 30. Pistekorroosion autokatalyyttinen prosessi (Aromaa 2012).

Rakokorroosiota, joka on esitetty kuvassa 31, esiintyy raoissa, joihin liuos pääsee tunkeutumaan, mutta ei pääse vaihtumaan samalla nopeudella kuin muilla metallipinnan alueilla. Rakokorroosion syitä ovat liuoksen happamuuserot, hapen tai haitallisten ionien konsentraatioerot sekä inhibiittorien konsentraatioerot. Raoksi voi muodostua (Aromaa 2014, s.3.):

- Kolo tai syvennys metallin pinnalla
- Metallin ja kaasukuplan välissä oleva tila
- Korroosiotuotekerroksen ja metallin välissä oleva tila
- Metallin ja tiivisteen välinen tila

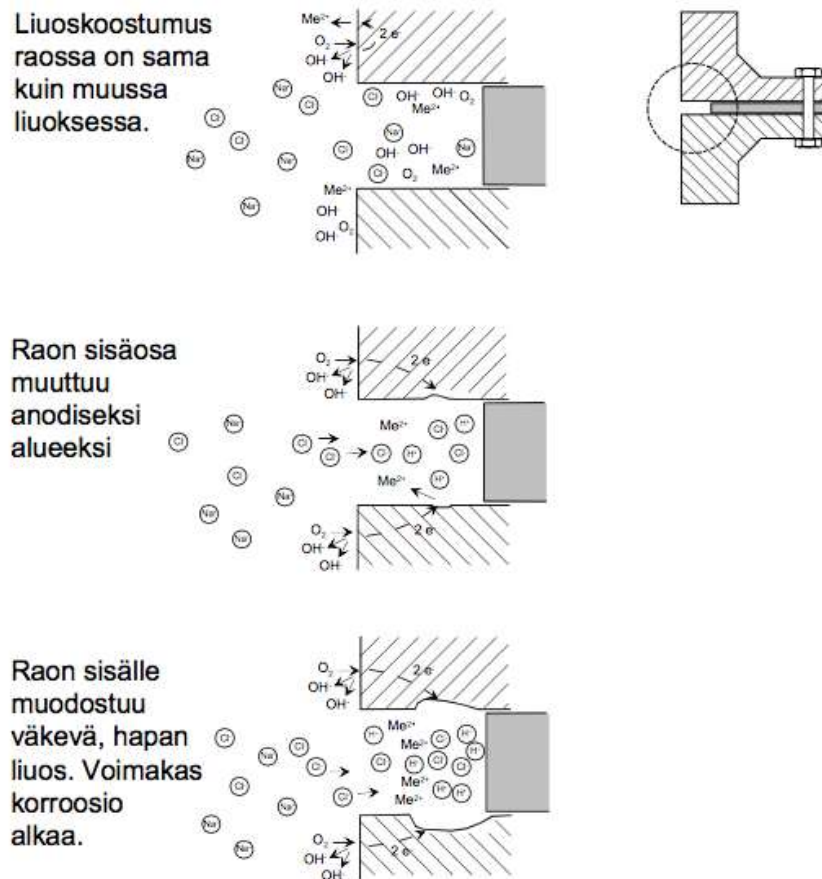


Kuva 31. Rakokorroosio ruostumattomassa teräksessä (316) PTFE-eristeen alla (Davis 2000).

Rakokorroosion mekanismissa on kaksi vaihetta (Aromaa 2012, s.74-75.):

1. Korroosio raon sisällä on yhtä nopeaa kuin muillakin kappaleen pinnoilla. Anodisena reaktiona on metallin liukeneminen ja katodisena reaktiona tyypillisesti hapen pelkistyminen. Raossa oleva liuos ei pääse kiertämään ja hapen konsentraatio raossa olevassa liuoksessa laskee. Happikonsentraatiokenno muodostuu, kun raon happiköyhempi alue muodostuu anodiksi. Metallin liukeneminen jatkuu, joten raossa olevaan liuokseen jää ylimääräinen positiivinen varaus Me^{n+} -ionien muodossa. Varauksen tasaamiseksi kulkeutuu rakoon negatiivisia varauksia, jotka ovat usein kloridi-ioneja. Liuoksen ja ionien välinen reaktio tuottaa metallihydroksidia sekä vapaata happoa.
2. Passiivikerros tuhoutuu ja rakokorroosio alkaa edetä raossa olevan liuoksen väkevöityessä ja happamoituessa.

Kuvassa 32 on esitetty liuosmuutosmalli rakokorroosiolle neutraalissa happipitoisessa liuoksessa.



Kuva 32. Rakokorroosion vaiheet (Aromaa 2014).

Piste- ja rakokorroosion estäminen perustuu suunnitteluun ja materiaalivalintaan. Pistekorroosiota estetään estämällä liuosten väkevöityminen pinnoilla ja rakokorroosiota estetään suunnittelemalla raot joko riittävän tiukoiksi tai avoimiksi. Passivoituvien metallien piste- ja rakokorroosiokestävyys riippuu niiden seostuksesta. (Aromaa 2012, s.75.) Molybdeeniä 4-6 p-% sisältävät ruostumattomat teräkset ja molybdeeni-volframi-nikkeli seokset kestävät pistekorroosiota hyvin (Davis 2000, s.105). Molybdeenin lisäys parantaa myös rakokorroosionkestoa (Davis 2000, s.114). Tiivistemateriaalin valinta vaikuttaa rakokorroosion muodostumiseen. Elastomeeritiivisteet kiihdyttävät vähemmän rakokorroosiota kuin polytetrafluorieteenitiivisteet (PTFE). (Davis 2000, s.114.)

3.2.4 Valikoiva liukeneminen

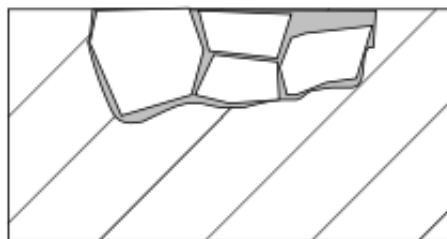
Valikoivalla liukenemisella tarkoitetaan faasien jalousaste-erosta johtuvasta metalliseoksen jonkin seosaineen tai mikrorakenneosan muita nopeampaa liukenemista. Sillä on kaksi vaihtoehtoista mekanismia:

- Koko seos liukenee, mutta mahdollisesti liennut jalompi metalli saostuu takaisin metallin pintaan.
- Vain epäjalompi metalli liukenee.

Valikoiva liukeneminen aiheuttaa tyypillisesti ongelmia kupariseoksilla, joissa jaloon kupariin on seostettu epäjalompia metalleja ja näistä tunnetuin esimerkki on messingissä tapahtuva sinkinkato. (Aromaa 2012, s.81.)

3.2.5 Raerajakorroosio

Metallien raerajoilla tapahtuu paikallista korroosiota sopivissa olosuhteissa. Raerajakorroosiota saattaa esiintyä ympäristöissä, joita ei yleensä pidetä syövyttävänä kyseiselle metallille, sillä korroosiokestävyyttä heikentäviä yhdisteitä voi muodostua raerajoille metalliseosten jähmettymisen, hitsauksen tai lämpökäsittelyjen yhteydessä. Epäpuhtaudet raerajoilla ja raerajojen rikastuminen tai köyhtyminen jonkin seosaineen suhteen voi myös aiheuttaa raerajakorroosiota. Raerajakorroosiota on hankala huomata, sillä korroosio on keskittynyt pienelle alueelle pienten ja lähellä toisiaan olevien anodi- ja katodialueiden takia. Raerajakorroosiossa voi syöpyä joko erillisten rakeiden pinta tai rakeiden välinen alue ja näistä jälkimmäinen etenee syvälle ja rikkoo metallin sisäisen rakenteen ollen näin vaarallisempi. (Aromaa 2012, s.75.) Kuvassa 33 on esitetty rakeiden välisen alueen korroosio.



Kuva 33. Raerajakorroosio, jossa epäjalojen raerajojen syöpyminen johtaa metallin heikkenemiseen ja rakeiden irtoamiseen (Aromaa 2012).

Raerajakorroosiota esiintyy tavallisesti seuraavissa tilanteissa (Aromaa 2012, s.75-76.):

- Kuumennettaessa 425-815 °C:ssa austeniittista ruostumatonta terästä, jossa yli 0,03% hiiltä.
- Pelkistävissä olosuhteissa nikkeli-kromiseoksilla.
- Muokatuissa alumiinikupari- ja alumiinimagnesiumseoksissa merivedessä tai vastaavassa suolaliuoksessa. Metallin pinta näyttää siltä, että se hilseilisi alumiiniseosten raerajakorroosiossa.

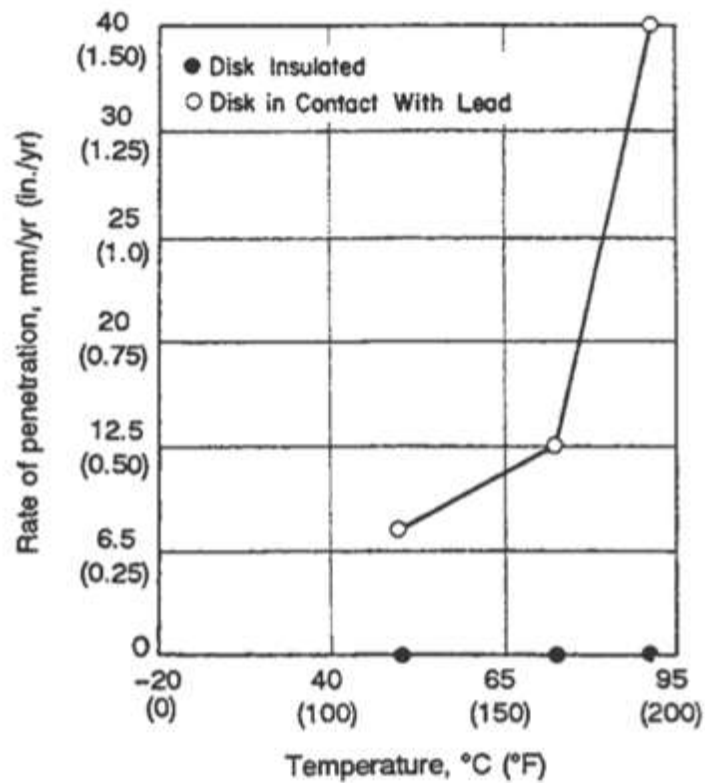
3.2.6 Eroosiokorroosio ja kavitaatio

Eroosiokorroosiolla tarkoitetaan virtauksen myötävaikutuksesta tapahtuvaa korroosiota olosuhteissa, joissa materiaali muutoin olisi korroosionkestävää. Sitä esiintyy liuoksen virratessa suurella nopeudella ja virtauksen ollessa turbulenttista. Eroosiokorroosio on virtaavan liuoksen aiheuttamaa mekaanisen kulumisen ja kemiallisen tai sähkökemiallisen syöpymisen yhteisvaikutusta, sillä liuenneet metalli-ionit poistuvat pinnalta virtauksen mukana eivätkä täten muodosta suojaavaa korroosiotuotekerrosta. Virtaus voi myös mekaanisesti kuluttaa suojaavat kerrokset pois ja tämä kuluttava vaikutus lisääntyy merkittävästi, jos liuoksessa on kaasukuplia tai kiinteitä partikkeleita. Johonkin suuntaan ryhmittyneet kuopat tai urat ovat tyypillisiä eroosiokorroosion aiheuttamia vaurioita, kuten kuvassa 34 esitetään. (Aromaa 2012, s.68.)



Kuva 34. Eroosiokorroosion jälkiä messingissä (Davis 2000).

Galvaaninen korroosio voi lisätä eroosiokorroosion vaikutusta. Kahden jalousasteeltaan erilaisen metallin galvaaninen korroosio saattaa olla mitätön seisovassa nesteessä, mutta tilanne voi muuttua merkittävästi virtaavassa nesteessä, kuten kuvassa 35 on esitetty. (Davis 2000, s.141.)



Kuva 35. Galvaanisen korroosion ja eroosiokorroosion yhteisvaikutus ruostumattoman teräksen (316) ollessa eristettynä ja yhteydessä lyijyyn. 10-% rikkihapon nopeus on 12 m/s. Ruostumattoman teräksen passiivikalvo hajosi galvaanisen korroosion ja eroosiokorroosion yhteisvaikutuksesta. Lyijy ja ruostumaton teräs eivät aiheuttaneet galvaanista korroosiota seisovassa nesteessä. (Davis 2000)

Useimmat metallit ovat herkkiä eroosiokorroosiolle, metallia sekä suojaavaa kerrosta murtavan, putken pinnalle kohdistuvan, virtausdynamiikasta johtuvan, leikkausjännityksen vuoksi. Värinä ja liuoksessa oleva kiintoaine lisäävät edelleen mekaanista räsytystä. Putkien sisäänmenoissa ja pumppujen juoksupyörissä esiintyy eroosiokorroosiota, sillä virtausnopeudet ja paineenvaihtelut ovat niissä suuria. Paineenvaihtelut aikaansaava kavitaatiota eli kaasukuplien muodostumisesta ja luhistumisesta johtuvia voimakkaita iskuja

metallin pintaan. Kavitaation aiheuttamat vauriot muistuttavat pistesyöpymää, mutta pisteet ovat hyvin lähellä toisiaan ja pinta vaikuttaa karhealta. (Aromaa 2012, s. 69-70.) Taulukossa 12 on esitetty meriveden virtausnopeuden vaikutus eri materiaalien korroosionopeuteen.

Taulukko 12. Meriveden virtausnopeuden vaikutus materiaalien korroosionopeuteen (Fontana 1987).

Materiaali	Korroosionopeus (mg/dm ² /päivä)		
	0,3 m/s	1,2 m/s	8 m/s
Hiiliteräs	34	72	254
Valurauta	45	-	270
Piipronssi	1	2	343
Amiralteettimessinki	2	20	170
Alumiinipronssi	5	-	236
Alumiinimessinki	2	-	105
90-10 Cu Ni (0,8% Fe)	5	-	99
70-30 Cu Ni (0,05% Fe)	2	-	199
70-30 Cu Ni (0,5% Fe)	<1	<1	39
Monel	<1	<1	4
316 ruostumaton teräs	1	0	<1
Hastelloy C	<1	-	3
Titaani	0	-	0

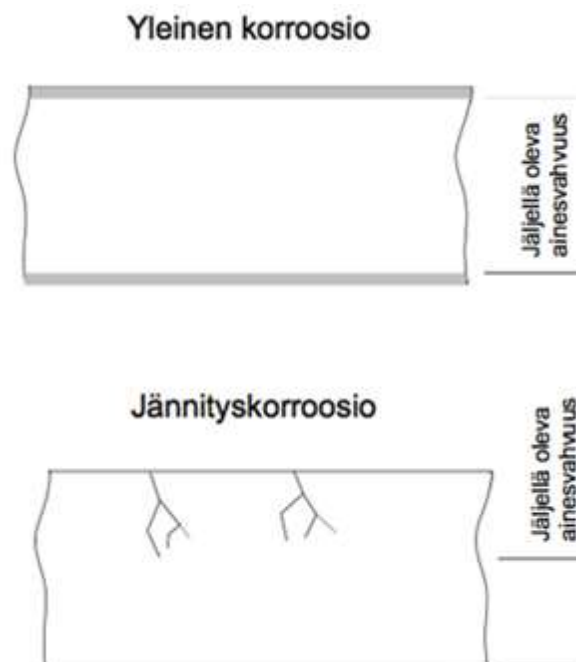
Eroosiokorroosiota estetään oikealla suunnittelulla ja materiaalivalinnalla. Järjestelmän tulisi olla sellainen, jossa virtaukset ovat riittävän hitaita ja kiintoaineiden ja kaasukuplien pääsy liuosvirtaan on estetty. Mekaanisen rasituksen kesto on materiaalin kestävyysmittari eroosiokorroosiota vastaan. Metallien kestävyys eroosiokorroosiota vastaan kasvaa, kun sitkeys, kovuus ja pinnan muokkauslujittuminen sekä kyky passivoitua kasvavat. (Aromaa 2012, s. 70.)

3.2.7 Jännityskorroosiomurtuma ja korroosioväsymä

Standardin SFS-ISO 8044 mukaan jännityskorroosio on korroosion ja ulkoisen tai sisäisen vetojännityksen yhdessä aiheuttama ilmiö (SFS-ISO 8044, s.16). Edellytykset jännityskorroosiomurtumalle ovat seuraavat:

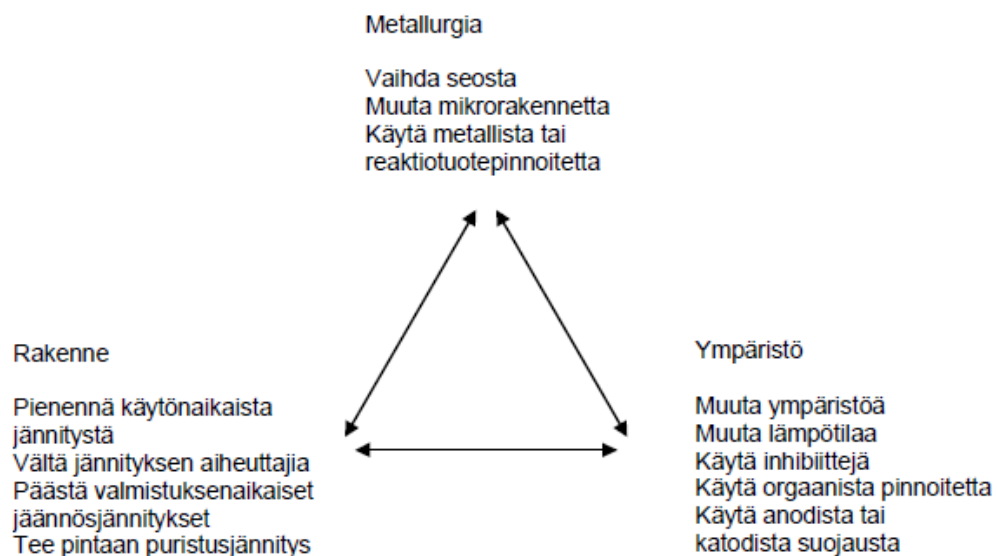
- Metallin pinnassa vaikuttava vetojännitys, joka voi olla ulkoista käyttöjännitystä tai materiaalinsisäisiä jäännösjännityksiä.
- Syövyttävä korroosioympäristö, jossa kappaleen pintaan syntyvät pistesyöpymät, syöpyvät raerajat tai rakokorroosioauriot keskittävät jännityksiä.
- Metallin ja syövyttävän aineen välillä on suojakerros, tai metalli on suurimmalta osaltaan passiivisessa tilassa. Pieni anodinen alue syntyy, kun metallin suojakerros tuhoutuu paikallisesti ja tämä alue toimii murtuman ytimenä tai passivoituu uudelleen.

Jännityskorroosiolla on olemassa tietty ydintymisaika, jolloin sen pintaan muodostuu korroosioaurioita ja säröjen alkua. Tämän jälkeen säröt alkavat kasvaa ja kun ne ovat heikentäneet rakennetta liikaa, niin tapahtuu rakenteen lopullinen tuhoutuminen, joka on yleensä mekaaninen murtuma. Jännityskorroosiossa vaurioiden kasvunopeus riippuu metallista ja ympäristöstä. (Aromaa 2012, s.76-78.) Kuvassa 36 on esitetty jännityskorroosion vaikutus materiaalin ainesvahvuuteen verrattuna yleiseen korroosioon.



Kuva 36. Ainesvahvuus yleisen ja jännityskorroosion vaurioittamassa kappaleessa (Aromaa 2012).

Korroosioväsyminen alkaa korroosioauriona ja etenee myöhemmin väsymismurtumana joko rakeiden halki tai raerajoja pitkin. Vaihteleva kuormitus aiheuttaa korroosioväsymisen ja jo lievästi syövyttävät ympäristöt voivat vähentää metallin väsymiskestävyyttä. Korroosioväsymisessä väsymisrajaa ei ole ja murtuma voi syntyä pienillä väsyttävillä jännityksillä kuormanvaihtoluvun kasvaessa. Jännityskorroosion ja korroosioväsymisen voi erottaa toisistaan tiettyjen ominaispiirteiden avulla. Jännityskorroosiossa murtuman kasvunopeus on ajasta riippuva, korroosioväsymisessä kasvunopeus riippuu kuormanvaihtokertojen lukumäärästä. Rakeiden läpi etenevä jännityskorroosiomurtuma on haaroittunut, raerajoja pitkin etenevä jännityskorroosiomurtuma on suhteellisen kapea ja suoraviivainen ja korroosioväsymismurtuma on leveähkö, suoraviivainen ja usein tylppäkärkinen. (Aromaa 2012, s.79.) Menetelmiä jännityskorroosion ja korroosioväsymisen estämiseksi on esitetty kuvassa 37.



Kuva 37. Jännityskorroosion ja korroosioväsymisen estäminen (Aromaa 2012).

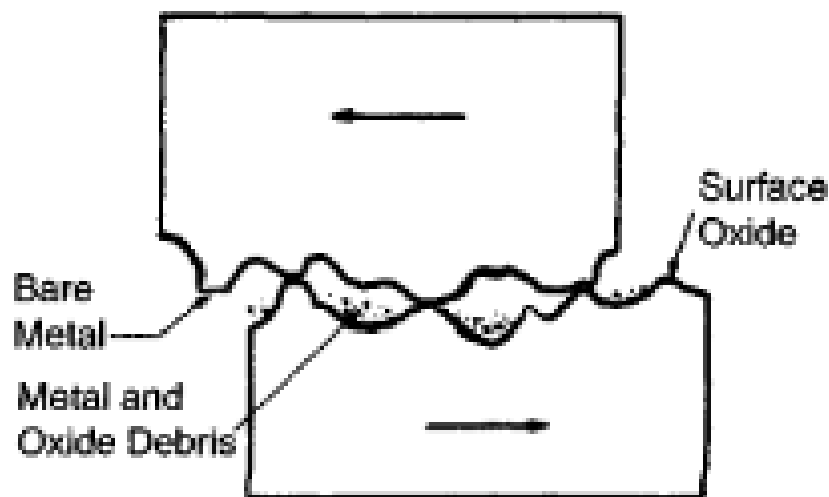
Vaarallisia ympäristöjä jännityskorroosion ja korroosioväsymisen kannalta ovat:

- Seostamattomille ja niukkaseosteisille teräksille kuumat ja väkevät emäsluokset, bikarbonaatti/karbonaattiliuokset noin 75 °C lämpötilassa sekä vedetön ammoniakki.
- Austeniittisille ruostumattomille teräksille kuumat kloridiliuokset ja polytionihapot.

- Nikkeliseoksille kuumat kloridiliuokset (kestävät väkevempiä liuoksia kuin austeniittiset ruostumattomat teräkset), polytionihappo ja väkevät emäkset yli 300 °C lämpötiloissa.
- Kupariseoksille ammoniakki ja typpioksideja sisältävä atmosfääri sekä amiinit.
- Lujaksi lämpökäsitellylle alumiinille atmosfääri ja vedet. (Aromaa 2012, s.81.)

3.2.8 Hiertymiskorroosio

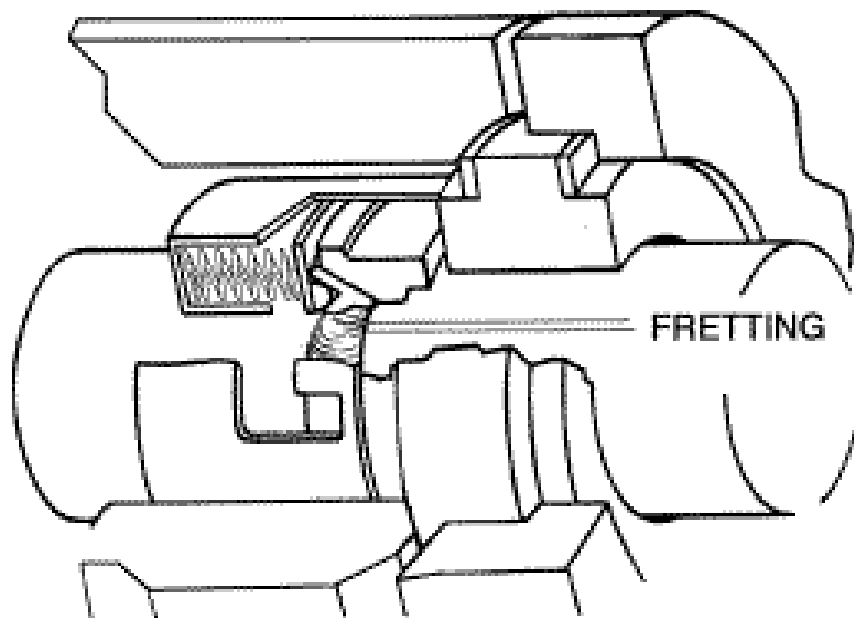
Kahden toisiinsa koskettavan sekä toisiinsa nähden edestakaisin liikkuvan pinnan ja korroosion yhdessä aiheuttama ilmiö, jota voi esiintyä esimerkiksi värähtelevien rakenteiden mekaanisissa liitoksissa (SFS-ISO 8044, s.16). Hiertymiskorroosiossa materiaalia irtoaa kontaktissa olevilta pinnoilta, kun pintojen välinen liike on rajoitettu erittäin pienen amplitudin värähtelyliikkeeseen. Hapettuminen on osa hiertymiskorroosiota, sillä irronneet partikkelit hapettuvat ja jäävät pintojen väliin. Hapettuneet partikkelit toimivat abrasiiveina ja poistavat entisestään materiaalia pinnoilta, kuten kuvassa 38 on esitetty. (Davis 2011, s.24.)



Kuva 38. Kahden pinnan väliin jääneet hapettuneet partikkelit kuluttavat pintoja (Davis 2011).

Esimerkkinä voidaan käyttää esimerkiksi liuospumppua. Pumpun akseli tekee aina sekä aksiaalista että radiaalista liikettä monista eri syistä, kuten laakeroinnin

toleransseista, värinästä ja akselin keskistyspoikkeamasta. Lisäksi tiivisteiden liike suhteessa akseliin on melko normaalia, mikä johtuu osien ja asennuksen toleransseista, lämpölaajenemisesta sekä akselin väärästä kohdistamisesta. Tiivisteiden jousi pyrkii jatkuvasti kohdentamaan tiivistettä akselin suhteeseen, mikä johtaa elastomeeritiivisteissä jatkuvaan edestakaiseen aksiaaliseen liikkeeseen pitkin akselia. Tämä liike irrottaa partikkeleita akselin oksidikerroksesta ja lopulta akseliin hiertyy ura, mikä johtaa liuoksen vuotamiseen ja akselin vaihtamiseen. (Mackay 2004, s.94.) Kuvassa 39 on esitetty hiertymiskorroosio pumpun akselilla tiivisteiden kohdalla.



Kuva 39. Tiivisteiden alle esiintyvä hiertymiskorroosio (fretting) pumpussa (McNally Institute 2015).

Hiertymiskorroosiolta voidaan välttyä voitelemalla kosketuksissa olevat pinnat, rajoittamalla liikkeen määrää, kuulapuhalluksella (karkeat pinnat eivät hierry yhtä pahasti kuin sileät), pinnan kovettamisella tai pinnoittamisella (Davis 2001, s.25). Pumppuihin ainoa kestävä ratkaisu on käyttää ei hiertäviä tiivisteitä, kuten paljetitiivistettä (Mackay 2004, s.94).

3.3 Korroosionesto

Korroosionkestävyys tarkoittaa materiaalin toimintakyvyn säilyttämistä tietyssä rakenteen ja ympäristön muodostamassa korroosiojärjestelmässä. Korroosiossa kaikki vaikuttaa kaikkeen, kuten kuvassa 43 on esitetty. (Aromaa 2012, s.94.)



Kuva 43. Korroosionkestävyyteen vaikuttavat tekijät (Aromaa 2012)(Muokannut JS).

Korroosion hallitsemiseksi on käytännössä olemassa kuusi yleistä tapaa:

1. Huolellinen suunnittelu
2. Materiaalien valinta
3. Pinnoitteiden käyttö
4. Liuosympäristön muuttaminen
5. Sähköinen suojaus
6. Ei tehdä mitään

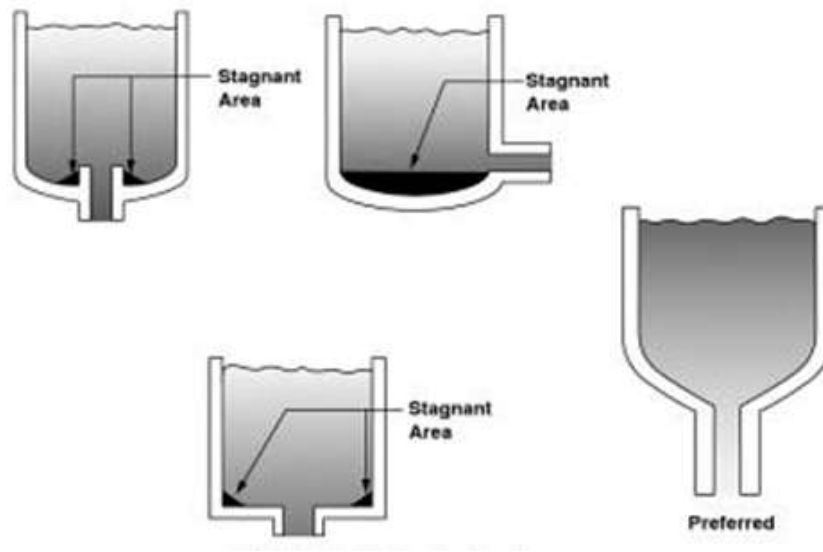
Kuudennellakin vaihtoehdolla voidaan päästä järkevään ja taloudelliseen ratkaisuun, mutta silloin rakenteen suunnittelijoiden, käyttäjien ja huollosta vastaavien tulee tietää tarkasti materiaalin tuhoutumisnopeus ja kaikki siihen vaikuttavat seikat. (Aromaa 2012, s.95.) Kyseessä on valinta vaihtoehtojen "korjataan tarvittaessa" ja "varaudutaan ennakolta" välillä.

3.3.1 Suunnittelu

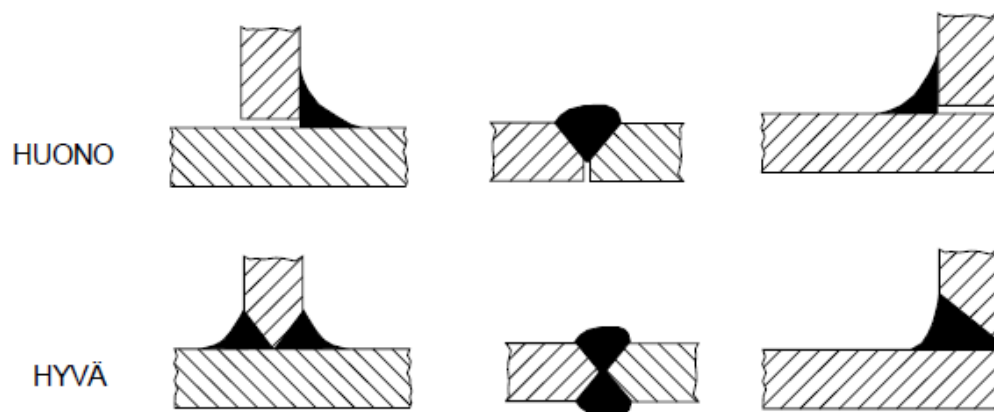
Korroosionesto alkaa suunnittelusta ja sen tarkoituksena on varmistaa rakenteen käyttöikä yliarvioimatta materiaalivehkuuksia (Aromaa 2012, s.95). Metallirakenteissa tyypillisiä, huonosta suunnittelusta johtuvia, korroosio-ongelmien aiheuttajia ovat (Verink 2011, s.83.):

- Eri metallien liittäminen toisiinsa.
- Rakenteen huono tyhjeneminen ja tuuletus, kuva 44.
- Erilaiset raot rakenteessa, kuva 45.
- Hajavirrat rakenteissa.
- Liuoksen koostumuksen vaihtelusta johtuvat korroosiokennot.
- Kappaleiden välinen liike tai kappaleen ja ympäristön välinen liike.
- Rakenne tehty materiaalista, jossa tapahtuu valikoivaa liukenemista.
- Pinnan kunnollinen puhdistaminen ei ole mahdollista.

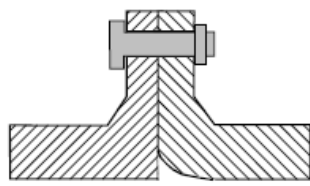
Lisäksi on runsaasti pieniä yksityiskohtia, jotka vaikuttavat merkittävästi rakenteen korroosionkestävyyteen. Näitä on esimerkiksi erilaisten metallien liitokset, katkohitsit, terävät kulmat jne, kuvat 45 ja 46. (Aromaa 2012, s.96.)



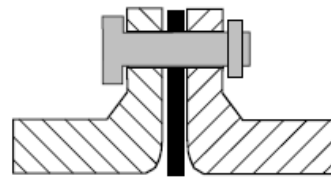
Kuva 44. Esimerkki huonosta ja hyvästä rakenteen tyhjenemisestä (Verink 2011).



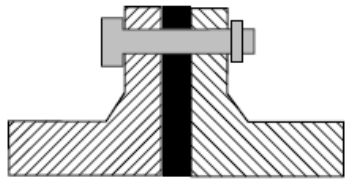
Kuva 45. Rakojen ja kolojen välttäminen hitsiliitoksessa (Aromaa 2012).



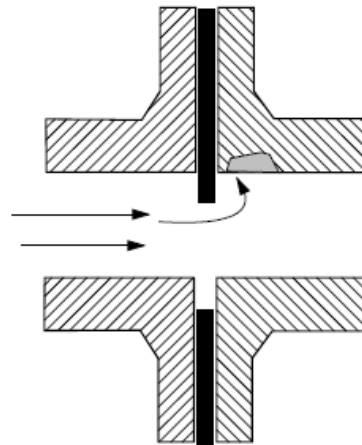
Vältä eri metallien yhdistämistä



Varo rakoja



Käytä pultteja ja hitsiainetta, joka on jalompaa kuin liitettävät aineet



Liian pieni, liian suuri tai väärin asennettu tiiviste aiheuttaa turbulenssia

Kuva 46. Liitoksiin liittyviä suunnitteluohjeita (Aromaa 2012).

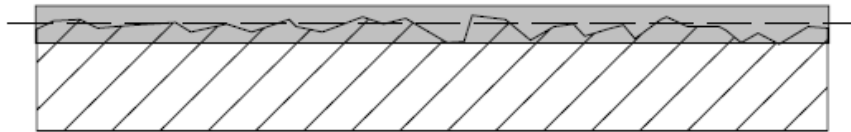
3.3.2 Pinnoittaminen

Pinnoitteet ovat metallisia, orgaanisia tai epäorgaanisia. Pinnoitteiden metallia suojaavat mekanismit ovat (Aromaa 2012, s.117.):

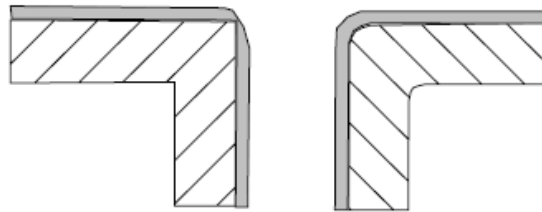
- Pinnoite erottaa metallin ympäristöstään. Pinnoite ei saa olla huokoinen.
- Pinnoite uhrautuu. Ehjänä pinnoite erottaa metallin ympäristöstä ja vaurioituessaan se liukenee perusmetallin sijasta.
- Pinnoite inhiboi. Maalit ja väliaikaiseen suojaukseen tarkoitetut öljyt ja rasvat ovat inhiboivia pinnoitteita. Ne toimivat tavallisten inhibiittien tavoin ja lisäksi ne erottavat metallin ympäristöstä.

Kaikissa pinnoitusmenetelmissä pintaprofiililla on tärkeä rooli, sillä sähkösaostetuissa pinnoitteissa pinnoite toistaa kaikki pohjamateriaalin virheet, liian sileään profiiliin maali ei kunnolla tartu ja liian karkeassa profiilissa jää ohuita kohtia (Aromaa 2012, s.100). Kuvassa 47 on esitetty pintaprofiilin ja muotojen vaikutus maalikalvon paksuuteen.

Liian tasaiseen pintaan maali ei tartu. Liian karkealla pintaprofiililla maalikalvosta tulee paikoitellen liian ohut.



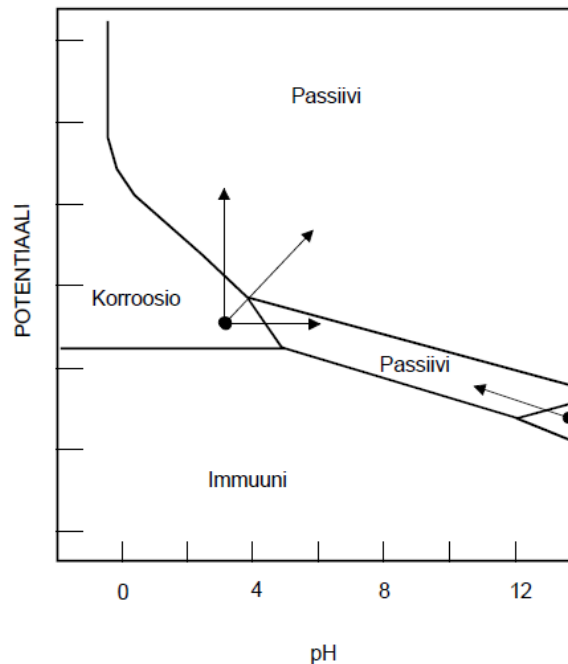
Liian teräviin kulmiin jää liian ohut maalikerros.



Kuva 47. Pintaprofiilin ja muotojen vaikutus maalikalvon paksuuteen (Aromaa 2012).

3.3.3 Liuosympäristön muuttaminen

Korroosiota voidaan hidastaa muuttamalla lämpötilaa, muuttamalla happamuutta tai poistamalla liuenneet suolat. Metalli saadaan siirtymään aktiivin korroosion alueelta passiivialueelle muuttamalla liuoksen pH:ta tai potentiaalia, kuten kuvassa 48 on esitetty. (Aromaa 2012, s.121.)



Kuva 48. Periaatekuva eri mahdollisuuksista liuosympäristön muuttamiseksi (Aromaa 2012).

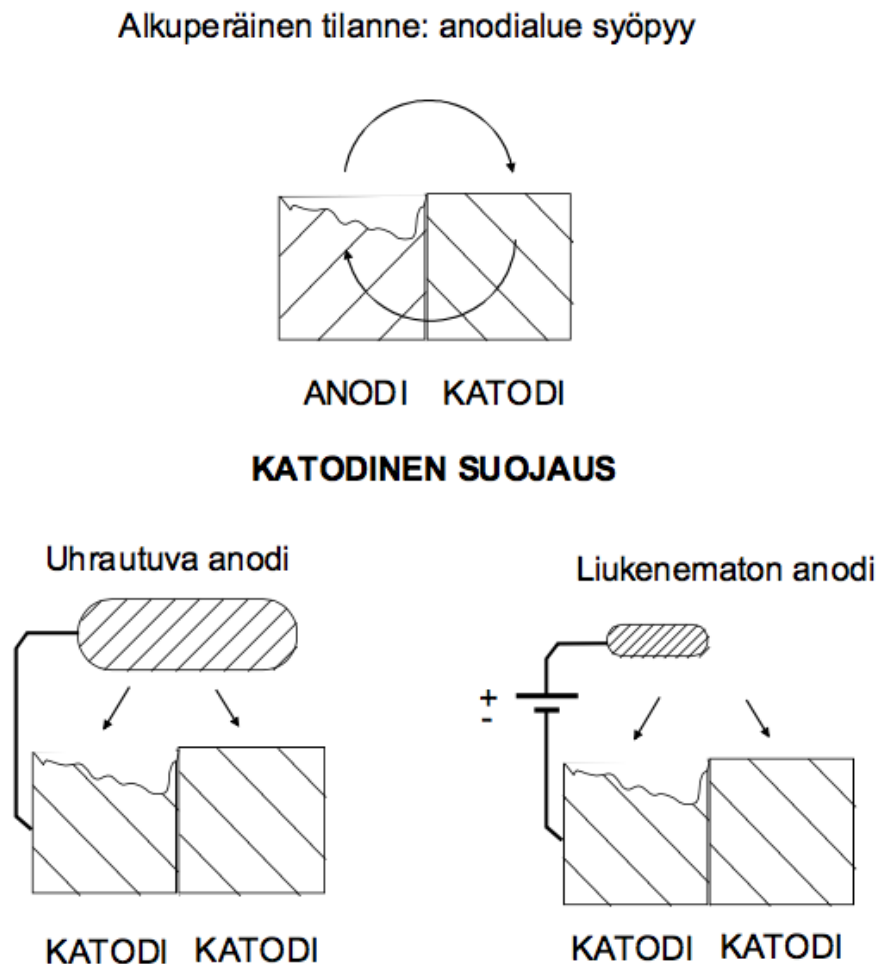
Inhibiitit ovat aineita, jotka pystyvät pienilläkin pitoisuuksilla vähentämään korroosiota. Inhibiittien eri tyypit ja toimintamekanismit ovat (Aromaa 2012, s.122.):

- Neutraloivat inhibiitit reagoivat liuoksessa esiintyvien happamien komponenttien kanssa.
- Filminmuodostavat inhibiitit muodostavat pinnoille ohuen suojaavan kalvon.
- Anodiset inhibiitit estävät anodista reaktiota.
- Katodiset inhibiitit estävät katodista reaktiota.

3.3.4 Sähköiset suojausmenetelmät

Anodista suojausta voidaan käyttää metallille, jolla on mahdollisuus passivoitua, mutta passivoitumista ajava katodinen voima ei ole riittävän voimakas. Passivoituminen saadaan käynnistymään lisäämällä metallin korroosionopeutta ulkoisella virralla, jolloin kriittinen passivoitumisvirrantiheys ylitetään. Muodostunut passiivikerros vaatii suojausjärjestelmän jatkuvaa käyttöä. (Aromaa 2012, s.124.)

Katodisessa suojauksessa korroosio saadaan hidastumaan siedettävälle tasolle suojattavan metallin potentiaalia laskemalla. Tämä toteutetaan joko uhrautuvilla anodeilla tai ulkoisella virtalähteellä. (Aromaa 2012, s.125.) Katodisen suojauksen toteutustavat on esitetty kuvassa 49.



Kuva 49. Katodisen suojauksen toteutus. Uhrautuvalla anodilla toteutetussa suojauksessa muodostetaan galvaaninen korroosiokenno, jossa vain uhrautuvat anodit syöpyvät. Liukenematonta anodia käytettäessä pakotetaan virta kulkemaan päinvastaiseen suuntaan kuin korroosiotilanteessa. (Aromaa 2012)

4 Materiaalinvalinta

Hyvin tehty tuote, joka toimii hyvin, antaa vastinetta rahalle ja tuottaa nautintoa käyttäjälle, on valmistettu käyttäen käyttötarkoitukseen parhaiten soveltuvia materiaaleja ja tuotteeseen on saatu käyttöön materiaalien täysi potentiaali sekä erityispiirteet. Halutussa materiaalissa on tietyt ominaisuudet, jotka parhaiten sopivat käyttösovellutukseen. Ominaisuudet ovat materiaalimaailman neuvotteluvaltteja, joiden perusteella valitaan jokin materiaali toisen tilalle. (Ashby 2011, s.32.) Valittavissa olevia materiaaleja on arviolta yli 40000 ja materiaalien määrän lisäksi useat valmistusmenetelmät yhdistettynä käyttösovelletuksen parametreihin voivat tehdä materiaalinvalinnasta hankalan tehtävän. Mikäli valintaa ei suoriteta huolella, on vaarana, että huomaamatta jää jokin vartenotettava vaihtoehto. Valinnan onnistumisessa auttaa systemaattisen valintamenetelmän käyttö. Useita kvantitatiivisia valintamenetelmiä on kehitetty, jotta ison tietomäärän analysointi materiaalin valinnassa voitaisiin systemaattisesti suorittaa. (Kutz 2006, s.466.) Tässä kappaleessa käsitellään materiaalivalinnan perusteita eritoten korroosionkestävyyden kannalta, esitellään perustietoa konstruktiomateriaaleista ja käydään läpi menetelmiä materiaalinvalintaan.

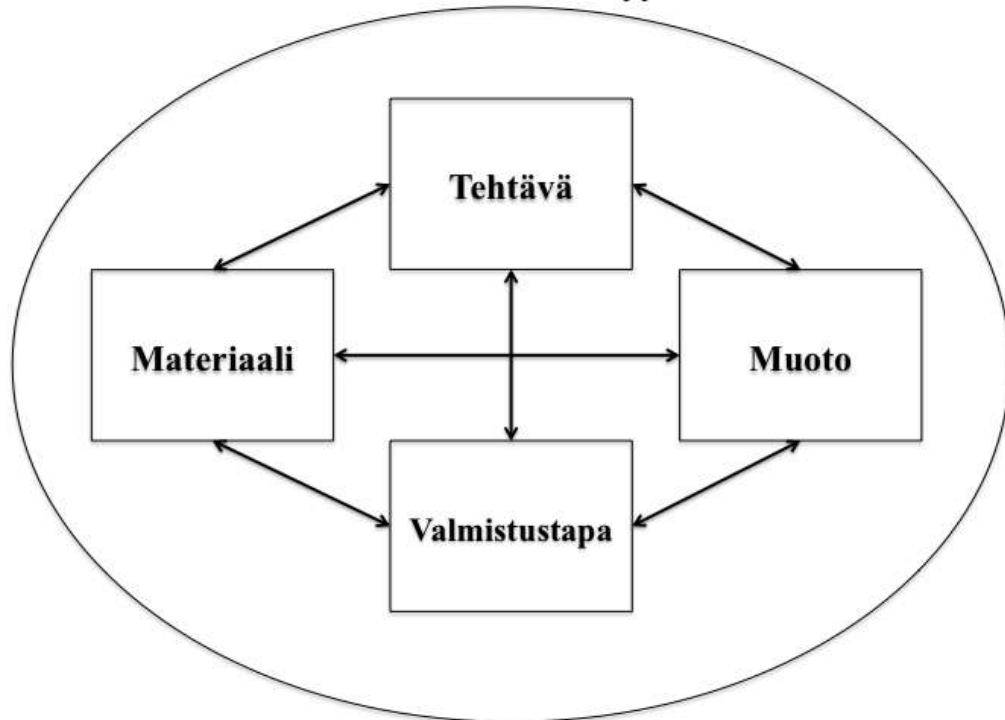
4.1 Materiaalinvalinnan perusteet

Materiaalin valinta riippuu valmistettavan tuotteen tehtävästä, mutta se ei ole ainoa rajoite, sillä materiaalin valinta on sidottu myös tuotteen valmistustapaan ja haluttuun muotoon. Saavuttaaksemme jonkin muodon, on materiaalin läpikäytävä valmistusprosesseja, jotka sisältävät muovaamista (esim. valaminen ja takominen), materiaalin poistoa (esim. työstö ja poraus), liittämistä (esim. hitsaus) ja viimeistely prosesseja (esim. maalaus). Valittu materiaali puolestaan vaikuttaa käytettävissä oleviin valmistusprosesseihin. Vuorovaikutukset ovat kaksisuuntaisia, sillä haluttu muoto rajoittaa valittavia materiaaleja ja valmistusprosesseja, mutta yhtälailla valmistusprosessien rajoitukset rajoittavat käytettävää materiaalia ja saavutettavia muotoja. Mitä monimutkaisempi kappaleen suunnittelu, sitä tiukemmat ovat laatuvaatimukset ja vuorovaikutukset tehtävän, materiaalin, valmistustavan ja muodon välillä. (Ashby 2011, s.22-23.)

Tämän lisäksi merkittävänä osana materiaalivalintaa on korroosionkestävyys, sillä liian alhaisella korroosiokestävyydellä varustetun materiaalan ennen aikainen vaurioituminen voi johtaa kalliisiin huoltotaukoihin. Toisaalta tarpeettoman suuri korroosiokestävyys materiaalista nostaa turhaan hintaa. Materiaalivalinnan haaste onkin saavuttaa tarkoituksenmukaiset ominaisuudet mahdollisimman halvalla. Joillain aloilla, kuten paperiteollisuudessa, korroosionkestävyys on erittäin tärkeä materiaaliominaisuus ja materiaalivalinnassa joudutaan tekemään kompromissi korroosionkestävyyden ja muiden ominaisuuksien välillä, kuten esimerkiksi lujuuden tai hitsattavuuden. (Davis 2000, s.331.) Korroosionkestävyys on kuitenkin harvoin pääasiallinen ominaisuus materiaalia valittaessa ja kaikki rakennemateriaalit ovat herkkiä jonkin tyyppiselle ja asteiselle korroosiolle ja esimerkiksi suuret rakenteet valmistetaan tavallisesti rakenneteräksistä kohtalaisen hyvien mekaanisten ominaisuuksien ja edullisuuden vuoksi vaikka niiden korroosionkestävyys on heikko. Ne suojataan maalaamalla tai muilla korroosionestomenetelmillä. Vasta luonnollisia ympäristöjä ankarammissa ympäristöissä on korroosiota kestävien seosten käyttö yleistä. Korroosio-ongelmiin tehokkain ratkaisu on usein materiaalivalinta, mutta monissa tapauksissa valittava materiaali on liian kallis. (Aromaa 2012, s.101.) Kuvassa 51 on esitetty vuorovaikutustusten keskenäiset suhteet.

Lisäksi kaikki edellä mainitut vaikuttavat valmistettavan tuotteen korroosionkestävyyteen. Tuote altistuu tietynlaiselle korroosioympäristölle tehtävästään riippuen, eri materiaaleilla on erilaisen korroosionkestävyydet eri ympäristöissä, tuotteen muoto vaikuttaa korroosionkestävyyteen (jääkö rakoja tai tyhjeneekö rakenne mahdollisista liuoksista) ja eri valmistustavat voivat joko parantaa tai huonontaa korroosionkestävyyttä (maalauksella parannetaan, hitsaus voi huonontaa).

Korroosionkestävyys



Kuva 51. Materiaalinvalinnan keskeinen ongelma: vuorovaikutus tehtävän, materiaalin, valmistustavan ja muodon välillä (Ashby 2011)(Muokannut ja suomentanut JS).

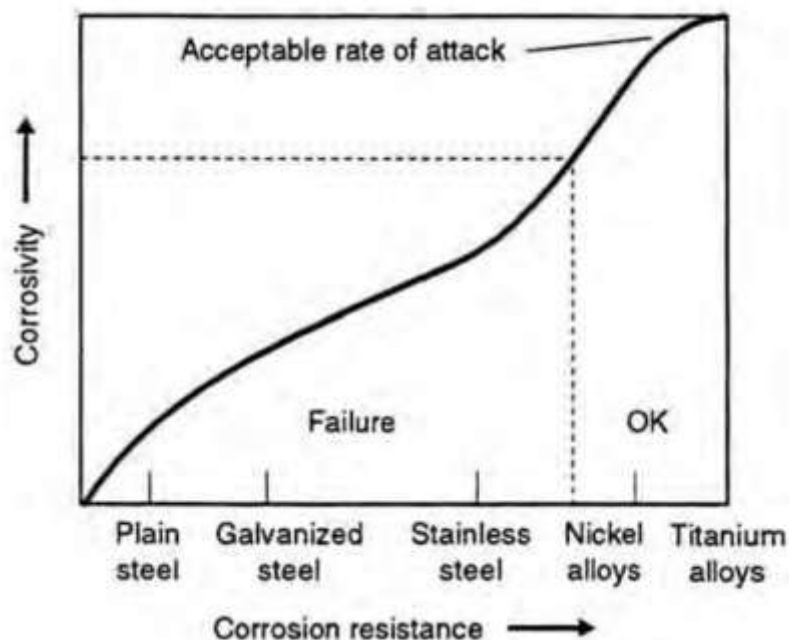
Valmistettava tuote, käyttötarkoituksen mukaan, vaatii tiettyjä materiaaliominaisuuksia, kuten esimerkiksi tiettyä tiheyttä, lujuutta ja hintaa. On tärkeää aloittaa materiaalin valitseminen mahdollisimman useilla vaihtoehtoilla, sillä muuten saatetaan menettää hyviä vaihtoehtoja. Innovatiivista ratkaisua haettaessa, tulee valinta tehdä suunnitteluprosessin alkupäässä, sillä myöhemmin on tehty liikaa valintoja ja sitoutumisia jolloin radikaali muutos (olemassa oleviin ratkaisuihin verrattuna) on mahdotonta. Yleisesti materiaalin valitseminen kiteytyy kahteen kohtaan:

1. Haluttujen ominaisuuksien tunnistaminen
2. Haluttujen ominaisuuksien vertailu olemassa oleviin materiaaleihin ja parhaan vaihtoehdon löytäminen

Ensimmäinen vaihe valinnassa on tutkia tuotteen vaatimukset ja tunnistaa niiden aiheuttamat rajoitukset materiaalinvalinnalle. Materiaalivaihtoehdot vähenevät

selkeästi poissulkemalla materiaalit jotka eivät täytä vaatimuksia. Jäljelle jääneet vaihtoehdot asetetaan järjestykseen sen mukaan kuinka hyvin ne pystyvät maksimoimaan halutun suorituskyvyn. (Ashby 2011, s.98-99.) Huomioitavaa on, että ei ole olemassa universaalisti hyväksyttyä materiaalinvalinta prosessia, vaan eri aloilla on eri vaatimukset, jotka muuttavat valintaprosessia (Davis 2000, s.333).

Korroosioneston kannalta materiaalinvalinnassa on kolme toisiinsa yhteydessä olevaa merkittävää tekijää: korroosioympäristö, materiaalin korroosionkestävyys ja hyväksyttävä korroosionopeus, kuten kuvassa 52 on esitetty (Davis 2000, s.349-350).

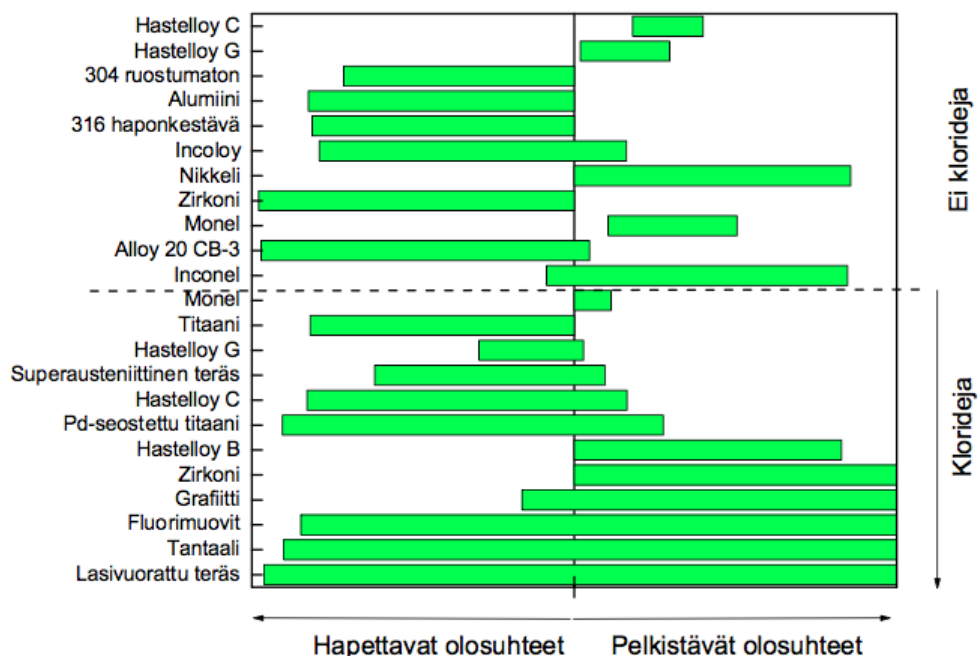


Kuva 52. Hypoteettinen tilanne materiaalin korroosionkestävyyden, korroosioympäristön ja hyväksyttävän korroosionopeuden välillä. Tietyllä ympäristön syövyttävyyden ja korroosionopeuden arvoilla valittavaksi jää materiaalit jotka ovat x-akselin leikkaavalla katkoviivalla tai sen oikealla puolella. (Davis 2000)

Korroosion kannalta materiaalinvalinnassa voi noudattaa esimerkiksi seuraavia vaiheita:

1. Selvitetään liuoksen tärkeimmät ominaisuudet syövyttävyyden kannalta (pH, lämpötila jne.) ja valitaan niiden perusteella sopiva materiaaleja.
2. Selvitetään materiaalien yleisen korroosion nopeus oletetuissa liuosolosuhteissa ja hylätään liikaa syöpyvät.
3. Selvitetään materiaalien taipumus erilaisiin paikallisen korroosion muotoihin.
4. Selvitetään korroosionopeuksien muuttuminen liuosolosuhteiden muuttuessa ja hylätään ne materiaalit, joissa esiintyy yleistä tai paikallista korroosiota muuttuneissa olosuhteissa.
5. Tehdään tarkempi selvitys ja mahdollisia korroosiokokeita jäljelle jääneille materiaaleille korroosionkestävyyden varmistamiseksi.

Erilaisia kaavioita ja taulukoita on olemassa yllä esitettyjen työvaiheiden avuksi. Esimerkkinä kyseisistä kaavioista on kuvassa 53 esitetty Stern-Bishop-diagrammi, jonka avulla voidaan vertailla eri materiaalivaihtoehtoja hapettavissa ja pelkistävissä olosuhteissa kloridien joko ollessa läsnä tai ei. (Aromaa 2012, s.102.)



Kuva 53. Stern-Bishop-diagrammi materiaalinvalinnan tueksi (Aromaa 2012).

4.2 Materiaalin valintamenetelmät

4.2.1 Ashbyn kartat

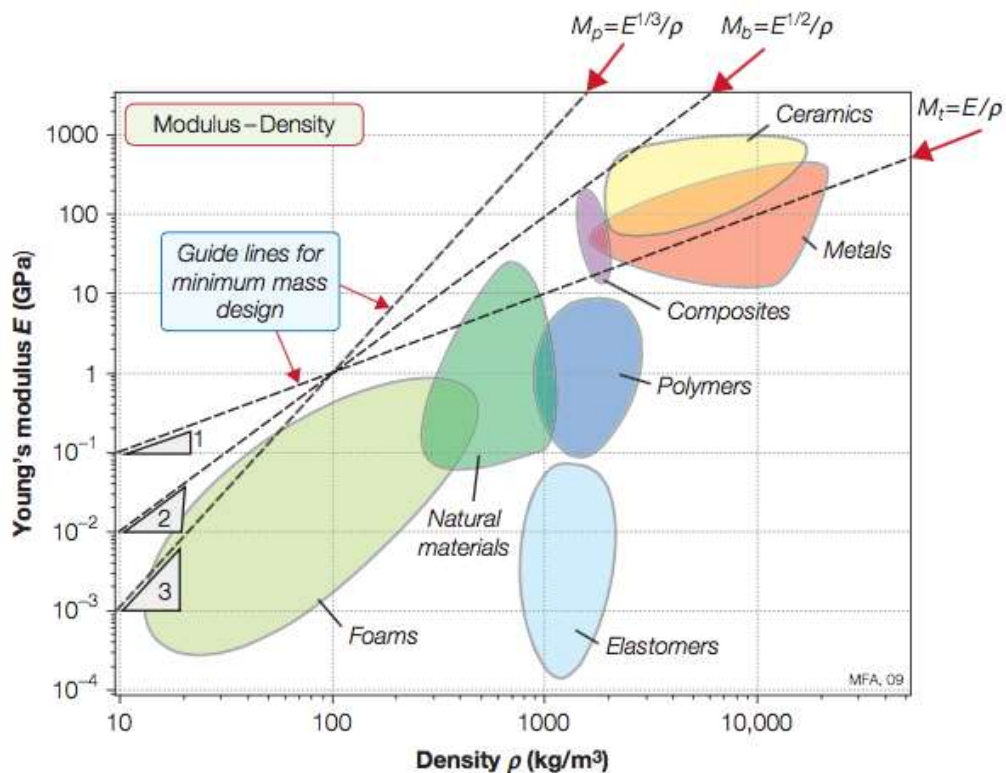
Ashbyn valintakartat ovat käyttökelpoisia työkaluja materiaalien alkuseulonnassa (Kutz 2006, s.471). Valinta lähtee liikkeelle haluttujen materiaaliominaisuuksien valinnasta ja jokaiseen rakenteeseen liittyvien rajoitteiden tunnistamisesta. Näistä ominaisuuksista ja rajoitteista muodostetaan materiaali-indeksi. (Ashby 2011, s.115-116.) Taulukossa 14 on esitetty erilaisia materiaali-indeksejä riippuen halutuista ominaisuuksista ja rakenteen rajoituksista.

Taulukko 14. Esimerkkejä erilaisista materiaali-indekseistä (Ashby 2011).

Funktio	Haluttu ominaisuus	Rajoite	Materiaali-indeksi
Sauva	Mahdollisimman kevyt	Jäykkyys	E/ρ
Palkki	Mahdollisimman kevyt	Jäykkyys	$E^{1/2}/\rho$
Palkki	Mahdollisimman kevyt	Lujuus	$\sigma_y^{2/3}/\rho$
Palkki	Mahdollisimman halpa	Jäykkyys	$E^{1/2}/C_m\rho$

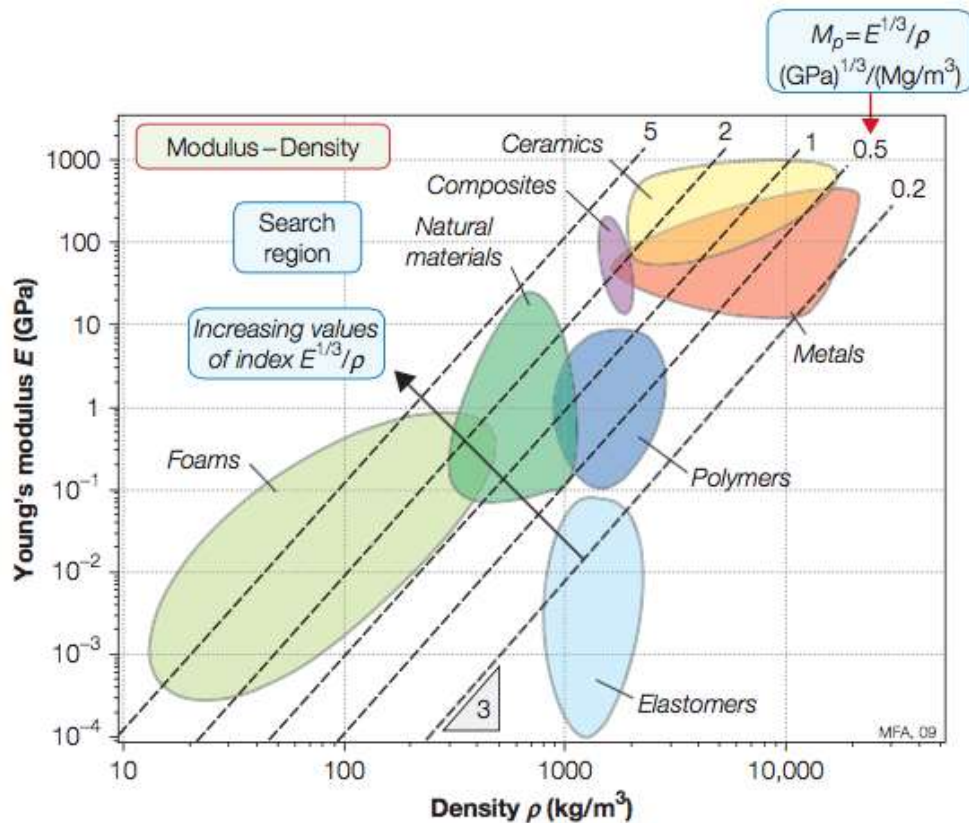
ρ tiheys, E kimmokerroin, σ_y myötöraja, C_m hinta/kg

Kuvaajaan piirretään tämän jälkeen materiaali-indeksin mukaiset suorat, kuten kuvassa 54 on esitetty.



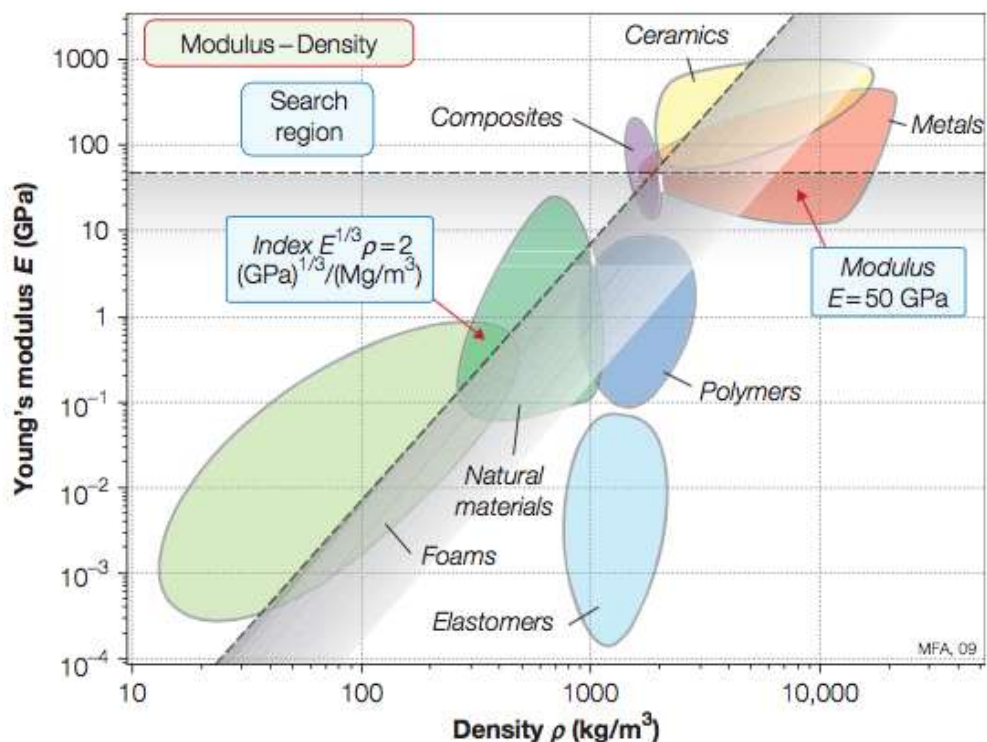
Kuva 54. Skemaattinen (E- ρ)-kuvaaja, jossa piirrettynä suorat kolmelle eri materiaali-indeksille (M_p , M_b ja M_t) (Ashby 2011).

Kaikki materiaalit, tietyllä materiaali-indeksin määrittämällä, suoralla toimivat yhtä hyvin. Suoran yläpuolella olevat materiaalit ovat parempia ja vastaavasti suoran alapuolella olevat materiaalit ovat huonompia kuin suoralla olevat materiaalit. (Ashby 2011, s119.) Kuvassa 55 on esitetty (E- ρ)-kuvaaja materiaali-indeksin $M=E^{1/3}/\rho$ arvoilla $0,2-5 \text{ (GPa)}^{1/3}/(\text{Mg/m}^3)$.



Kuva 55. Skemaattinen (E- ρ)-kuvaaja, jossa piirrettynä materiaali-indeksin M_p suorat eri arvoilla. Kuvaajasta nähdään, että arvolla $2 \text{ (GPa)}^{1/3}/(\text{Mg/m}^3)$ saavutetaan sama jäykkyys kuin arvolla $0,2 \text{ (GPa)}^{1/3}/(\text{Mg/m}^3)$, mutta painoa rakenteella on vain kymmenys. (Ashby 2011)

Materiaalivalintaa voidaan entisestään rajata lisäämällä jokin rajoittava ominaisuuden arvo, kuten kuvassa 56 on esitetty (Ashby 2011, s.119).



Kuva 56. Skemaattinen (E-ρ)-kuvaaja, jossa piirrettynä suora materiaali-indeksin $E^{1/3}/\rho=2$ (GPa)^{1/3}/(Mg/m³) mukaan. Lisättynä rajoitus $E>50$ GPa. Kuvasta nähdään, että valittavana on materiaaleja keraameista, komposiiteista ja metalleista. (Ashby 2011)

4.2.2 Esawin ja Ashbyn metodi

Tämä menetelmä antaa kustannusarvion halutun tuotteen valmistukselle eri materiaalien ja valmistusprosessien yhdistelmillä. Menetelmä vertailee tarvittavien materiaalien raaka-aineiden, energian, pääoman, ajan ja informaation arvioituja kustannuksia. Menetelmää voidaan käyttää käyttösovelluksen suunnittelun alkumetreillä ja sillä voidaan vertailla eri materiaali ja valmistustapa kombinaatioita, kuten esimerkiksi polymeerikomponentin ruiskuvalulla valmistuksen hintaa voidaan verrata valamalla valmistetun alumiinikomponentin hintaan. (Kutz 2006, s.473.)

Menetelmän mukaan komponentin hintaan vaikuttaa kolme asiaa: materiaalikustannukset, työstökustannukset ja yleiskustannukset. Materiaalikustannus on raaka-aineen hinta per painoyksikkö kerrottuna tarvittavan materiaalin määrällä. Työstökustannukset yksittäistä komponenttia kohden ovat

käänteisessä suhteessa tuotettavien komponenttien määrän kanssa eli mitä enemmän tehdään komponentteja yhdellä kertaa, niin sitä halvemmaksi tulee hinta yksittäistä komponenttia kohden. Yleiskustannukset yksittäistä komponenttia kohden ovat käänteisessä suhteessa tuotannon nopeuden kanssa. (Kutz 2006, s.473.)

Menetelmän käyttö edellyttää materiaalitietokantaa, kuten CES 4, joka listaa materiaalien hinnat, eri prosessien ominaisuudet, tuotannon nopeuden, työkalujen keston ja arvion varusteiden sekä työstön kustannuksista. CES 4 ohjelma sisältää 112:sta eri valmistusmenetelmän tiedot. Ohjelman avulla voidaan luoda (kustannus-tuotantoerän koko) -kuvaaja eri valmistusmenetelmä ja materiaali kombinaatioille. Ohjelmalla voidaan myös arvioida suhteellinen hinta per komponentti eri prosessireittejä vertaillen. (Kutz 2006, s.473.)

4.2.3 Painotettu vertailumenetelmä

Painotetussa vertailumenetelmässä materiaaliominaisuuksille määritetään painokerroin α , jonka avulla lasketaan suoriutumisindeksi γ , jota voidaan käyttää eri materiaalien paremmuuden vertailuun (käyttökohteessa) (Kutz 2006, s.474).

Digitaalinen logiikka on työkalu painokertoimien määrittämiseen. Aluksi valitaan vertailuun halutut ominaisuudet, esimerkiksi korroosionkesto virtaavassa vedessä tai paino. Tämän jälkeen verrataan kaikki ominaisuudet keskenään ja tärkeämmälle annetaan arvo 1 ja vähemmän tärkeälle arvo 0. Lopuksi lasketaan painokerroin α kullekin ominaisuudelle jakamalla saatujen ykkösten määrä ykkösten kokonaismäärällä, kuten taulukossa 15 on esitetty. (Kutz 2006, s.474.)

Taulukko 15. Esimerkki digitaalisen logiikan ominaisuuksien vertailusta ja painokertoimien α laskemisesta. Alkuun ominaisuutta 1 on verrattu ominaisuuksien 2, 3, 4 ja 5 kanssa, jonka jälkeen ominaisuutta 2 on vertailtu ominaisuuksien 3, 4, ja 5 kanssa jne. (Kutz 2006)

Goals	Number of Positive Decisions $N = n(n - 1)/2$										Positive Decisions	Relative Emphasis Coefficient α
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1	1	1	0	1							3	0.3
2	0				1	0	1				2	0.2
3		0			0			1	0		1	0.1
4			1			1		0		0	2	0.2
5				0			0		1	1	2	0.2
Total positive decisions											10	$\Sigma\alpha = 1.0$

Suoriutumisindeksin γ määrittäminen aloitetaan laskemalla eri ominaisuuksien suhteutetut arvot B. Tekijät, joille toivotaan mahdollisimman suurta arvoa (lujuus, kovuus, jne.) suhteutetaan suurimpaan arvoon yhtälön (14) mukaisesti:

$$B = \frac{\text{ominaisuuden arvo}}{\text{valittavissa oleva maksimi arvo}} \times 100 \quad (14)$$

Tekijät, joille toivotaan mahdollisimman pientä arvoa (paino, korroosionopeus, jne.) suhteutetaan pienimpään arvoon yhtälön (15) mukaisesti:

$$B = \frac{\text{valittavissa oleva minimi arvo}}{\text{ominaisuuden arvo}} \times 100 \quad (15)$$

Ominaisuuksille, joille ei ole selkeää numeerista arvoa saatavissa, kuten työstettävyyys, annetaan esimerkiksi arvot 1-5 (1 tyydyttävä, 5 kiitettävä). Suoriutumisindeksi γ lasketaan yhtälöllä (16):

$$\gamma = \sum_{i=1}^n B_i \alpha_i \quad (16)$$

Suoriutumisindeksiä laskettaessa hinta voi olla yksi arvioitavista kriteereistä, mutta tapauksissa, joissa on paljon eri ominaisuuksia arvioitavana tai valittaessa materiaalia tyhjän tilan täyttöön, niin suoriutumisindeksi voidaan lopuksi jakaa hinnalla, jolloin saadaan arvo M yhtälön (17) mukaisesti:

$$M = \frac{\gamma}{c_p} \quad (17)$$

jossa C on materiaalin kokonaiskustannus painoon suhteutettuna ja ρ materiaalin tiheys. Kokonaiskustannuksissa voi olla mukana valmistuskustannukset, viimeistelykustannukset, asennuskustannukset jne. (Kutz 2006, s.475-476.)

5 Vaurioselvitysten suoritus

Kokeellisessa osuudessa selvitettiin korroosion aiheuttamia kuluja suolasirotinlaitteistoissa ja mahdollisuutta vaikuttaa kuluihin materiaalivalinnoilla. Lisäksi tutkittiin eri valmistajien automaattien ja eri vuosimallien kuluja, jotta saataisiin selville onko eri vuosimalleissa tai valmistajissa selkeästi havaittavia eroja. Destia Oy:n huoltohistoriasta saatiin suolasirotinlaitteistot järjestettyä kalleimmasta halvimpaan korjauskulujen mukaan. Korjauskuluista vähennettiin itse aiheutetut ylimääräiset korjauskulut, kuten sirotinlaitteiston törmäyksessä aiheutuneet kulut, jotta suolasirotinlaitteistot järjestäytyvät mahdollisimman tarkasti normaalissa käytössä aiheutuvien kustannusten mukaan. Huoltohistoriasta saatiin myös automaattit järjestettyä vuosimallien ja valmistajien mukaan. Tässä työssä tarkasteltiin vain AM:n ja Nido Stratoksen laitteistot, jotka ovat olleet käytössä aikavälillä 1.10.2010-30.9.2014 ja jotka olivat tarkasteluhetkellä maksimissaan 12 vuotta käytössä olleita. Seuraavaksi valittiin huoltokuluiltaan kymmenen kalleinta ja halvinta automaattia. Näiden automaattien huoltolaskuista listattiin vaihdetut osat ja niiden hinnat. Näistä osista valittiin tarkasteltavat osat, joille tehtiin vaurioanalyysi. Nido Stratos automaateista ei ole huoltolaskuista saatavissa tarkkoja hintoja osille, sillä kyseiset automaattit huolletaan huoltosopimuksella. Nidon osien valinnassa tukeuduttiin Wihuri Oy:n Tomi Peltosen antamiin tietoihin. Tähän työhön ei otettu tarkasteluun mukaan valoja eikä hytissä sijaitsevia ohjainlaitteita. Vaurioanalyysissä selvitettiin onko osan rikkoutuminen korroosion aiheuttamaa ja voidaanko rikkoutuminen estää tai sitä hidastaa materiaalivalinnoilla. Osien materiaalianalyysi suoritettiin Oxford instrumentsin X-MET 5100 analysaattorilla. Materiaalivalinta suoritettiin CES materiaalitietokannalla ja painotetulla vertailumenetelmällä.

6 Tulokset ja tulosten tarkastelu

6.1 Tutkittavat suolasirotinlaitteiston osat

Liitteessä 1 on esitetty kymmenen huoltokuluiltaan kalleinta ja halvinta automaattia. Taulukoissa 16 ja 17 on esitetty yhteenvedot kymmenen huoltokuluiltaan kalleimman ja halvimman Arctic Machinen automaatin vaihdetuista osista järjesteltynä hinnan mukaan.

Taulukko 16. Yhteenveto kymmenen huoltokuluiltaan kalleimman AM:n automaatin vaihdetuista osista. Osat on järjestetty A-hinnan mukaan.

Osa	Määrä (kpl)	A-hinta yht. (€)	% kuluista	% määrästä
Karamoottori l30/l36	18	14291	23,7	8,7
HD-moottori omp-32em	15	8536	14,2	7,2
Vesipumppu ob 11500	4	7150	11,9	1,9
Takaohjausyksikkö 2005 cpu30	4	5125	8,5	1,9
Hd-moott. Omp 50em	6	3867	6,4	2,9
Mikrofoni MCL2	7	2134	3,5	3,4
Hydrauliikkaletkut	31	1855	3,1	14,9
Hd-moott. Omt 500 em	1	1800	3,0	0,5
Pulssianturi PNP	6	1457	2,4	2,9
Kaasujouset	17	1446	2,4	8,2
Jalan vinssi DL 1402A / Vastaava	16	1240	2,1	7,7
Pistoke 7/10-napaa	19	293	0,5	9,1
MUUT	64	11081	18,4	30,8
YHT	208	60277	100	100

Taulukko 17. Yhteenveto kymmenen huoltokuluiltaan halvimman AM:n automaatin vaihdetuista osista. Osat on järjestetty A-hinnan mukaan.

Osa	Määrä (kpl)	A-hinta yht. (€)	% kuluista	% määrästä
Karamoottori 36	4	2970	27,1	3,7
Pulssinanturi PNP	8	1976	18,0	7,5
Kaasujouset	14	1303	11,9	13,1
Mikrofoni mcl	3	902	8,2	2,8
HD-moottori				
OMP 32 EM	1	785	7,2	0,9
Vesiletku	9	412	3,8	8,4
Jalan vinssi / vastaava	3	267	2,4	2,8
Pistoke 7/10-nap	11	180	1,6	10,3
Hydrauliletku	2	74	0,7	1,9
MUUT	52	2093	19,1	48,6
YHT	107	10961	100	100

Taulukoissa 18 ja 19 on esitetty yhteenvedot kymmenen huoltokuluiltaan kalleimman ja halvimman Arctic Machinen automaatin vaihdetuista osista järjesteltynä kappalemäärän mukaan.

Taulukko 18. Yhteenveto kymmenen huoltokuluiltaan kalleimman AM:n automaatin vaihdetuista osista. Osat on järjestetty kappalemäärän mukaan.

Osa	Määrä (kpl)	A-hinta yht. (€)	% kuluista	% määrästä
Hydrauliikkaletkut	31	1855	3,1	14,9
Pistoke 7/10-napaa	19	293	0,5	9,1
Karamoottori l30/l36	18	14291	23,7	8,7
Kaasujouset	17	1446	2,4	8,2
Jalan vinssi DL 1402A / Vastaava	16	1240	2,1	7,7
HD-moottori omp-32em	15	8536	14,2	7,2
Mikrofoni MCL2	7	2134	3,5	3,4
Hd-moott. Omp 50em	6	3867	6,4	2,9
Pulssianturi PNP	6	1457	2,4	2,9
Vesipumppu ob 11500	4	7150	11,9	1,9
Takaohjausyksikkö 2005 cpu30	4	5125	8,5	1,9
Hd-moott. Omt 500 em	1	1800	3,0	0,5
MUUT	64	11081	18,4	30,8
YHT	208	60277	100	100

Taulukko 19. Yhteenveto kymmenen huoltokuluiltaan halvimman AM:n automaatin vaihdetuista osista. Osat on järjestetty kappalemäärän mukaan.

Osa	Määrä (kpl)	A-hinta yht. (€)	% kuluista	% määrästä
Kaasujouset	14	1303	11,9	13,1
Pistoke 7/10-nap	11	180	1,6	10,3
Vesiletku	9	412	3,8	8,4
Pulssinanturi PNP	8	1976	18,0	7,5
Karamoottori 36 Jalan vinssi / vastaava	4	2970	27,1	3,7
Mikrofoni mcl	3	267	2,4	2,8
Hydrauliletku	3	902	8,2	2,8
HD-moottori OMP 32 EM	2	74	0,7	1,9
MUUT	1	785	7,2	0,9
YHT	52	2093	19,1	48,6
	107	10961	100	100

Taulukossa 20 on esitetty Nido Stratos automaatteihin korroosion vuoksi useiten vaihdettavat osat.

Taulukko 20. Nido Stratos automaatteihin korroosion vuoksi useimmin vaihdettavat osat (Peltonen 2015a).

Osa	A-hinta (€)	Kuluvuus
Kaasujousi 2000N	98,1	1/huoltokausi/kone
Kaasujousi, perä	128,1	1/2huoltokautta/kone
Lautasen laakerointi	Ei paljoa	1/huoltokausi/50%koneista
Lautasen laakerisetti (kaikki osat)	200	1/huoltokausi/25%koneista
Lautasen anturi/ anturin liitin	353	
Karamoottori	812,9	1/käyttöikä/kone
Karamoottorin suojakumi	41,1	Tarpeen mukaan
Liuospumppu (kaikkine osineen)	3670,9	7/25konetta/huoltokausi2015
Liuospumpun moottori	712,3	
Levittimen kaapeli / NATO-liitin	195	
Auton kaapeli / NATO-liitin	359,2	
Lohko (hydraulic unit)	2571,6	joka viides laite/6v
Bluetooth	600	2/huoltokausi/25konetta

Taulukoiden 16, 17, 18 ja 19 perusteella tutkittaviksi valittiin AM:n automaateista karamoottori, HD-moottori OMP 32 Em, kaasujousi ja pulssianturi PNP.

Karamoottorin valinta oli selvä, sillä se kuului sekä kalleimmissa että halvimmissa automaateissa neljän kalleimman joukkoon ja lisäksi niitä oli vaihdettu paljon eritoten kalleimmissa koneissa. HD-moottori valittiin tarkasteltavaksi, sillä niihin kuluu merkittävä määrä rahaa kalleimmissa koneissa. Kaasujousi valittiin, sillä se oli vaihtomäärältään neljän parhaan joukossa sekä kalleimmissa että halvimmissa automaateissa ja tämän lisäksi halvimmissa koneissa se oli kolmanneksi kallein osa. Pulssianturi PNP valittiin, koska se oli halvimmissa koneissa merkittävä kuluerä ja niitä myös vaihdettiin määrällisesti paljon. Lisäksi pulssianturin valintaan vaikutti se, että se vaihdetaan usein samalla kuin hydraulimoottori, joka oli jo valittu tutkittavaksi osaksi. Hydrauliikkaletkuja ja pistokkeita ei valittu, vaikka niitä oli vaihdettu paljon, mutta kyseiset osat eivät muodosta merkittävää kuluerää kokonaiskuluista.

Taulukon 20 perusteella Nidon automaattien osista valittiin tutkittavaksi liuospumppu ja karamoottori. Liuospumppu valittiin, koska sen syöpyminen on tuore ongelma ja lisäksi se on kallein osa. Karamoottori valittiin, koska se on kallis osa ja selkeä ongelma myös AM:n automaateissa. Muita osia ei valittu, sillä saatu data osien vaihtomääristä ei ollut yhtä luotettavaa kuin Arctic Machinen automaattien osissa.

6.1.1 Karamoottori AM:n ja Nido Stratos automaateista

Neljä karamoottoria tutkittiin, joista kaksi oli vanhemman mallisia ja kaksi uudemman mallisia. Vanhemman mallisista karamoottoreista toinen oli Nidon automaatista ja toinen AM:n automaatista. Uudemmat karamoottorit molemmat olivat AM:n automaateista.

Kuvassa 57 on esitetty karamoottori kiinnitettynä AM:n automaattiin. Karamoottorin kiinnitys automaattiin on samankaltainen automaatin merkistä riippumatta.



Kuva 57. Uudemman mallinen karamoottori kiinnitettynä AM:n automaattiin.

Kuvissa 58 ja 59 on esitetty Nidon automaatista irrotettu, vanhemman mallinen, karamoottori ja AM:n automaatista irrotettu, uudemman mallinen, karamoottori.



Kuva 58. Nidon automaatista irrotettu ja vanhemman mallinen karamoottori.



Kuva 59. AM:n automaatista irrotettu ja uudemman mallinen karamoottori.

Keskustelussa Heikki Savanderin kanssa selvisi, että vanhemmassa karamoottorin versiossa ongelmana on potentiometrin syöpyminen ja uudemmassa karamoottorin versiossa ongelmana on sähköliitosten tiiveys. Uudemman karamoottorin rikkoo lähestulkoon aina liittimien syöpyminen. (Savander 2015.)

Ensimmäisenä avatussa AM:n automaatista irrotetussa, vanhemman mallisessa, karamoottorissa ongelmana oli Savanderin kuvailema potentiometrin syöpyminen, kuten kuvassa 60 näkyy. Karamoottorin moottori toimi jännitelähteeseen kytkettynä.



Kuva 60. Syöpynyt potentiometri. Korroosiota havaittavissa liitin osassa ja potentiometrin pohjassa.

Toisena avatussa Nidon automaatista irrotetussa, vanhemman mallisessa, karamoottorissa potentiometri ja muut elektroniikka komponentit olivat uuden veroisia, kuten kuvista 61 ja 62 näkyy. Kiteytynyttä suolaa oli havaittavissa hieman moottorissa, kuten kuvasta 62 näkyy. Karamoottorin moottori ja potentiometri toimivat moitteettomasti kytkettynä jännitelähteeseen.



Kuva 61. Nidon automaatista irrotetun karamoottorin uudenveroiset elektroniikkakomponentit.



Kuva 62. Kiteytynyttä suolaa karaa pyörittävässä moottorissa.

Kuvassa 63 on esitetty karamoottorin moottoria suojaavasta kotelosta irrotettu karaosa. Karan ulkokuoressa on havaittavissa selkeää korroosiota, mutta itse karassa ei ole mittavaa korroosiota. Karamoottorin karaa avatessa oli havaittavissa selkeää vioittumista, kuten kuvassa 64 näkyy.



Kuva 63. Moottorin kotelosta irrotettu kara.



Kuva 64. Nido automaatista irrotetun karamoottorin kara avattuna.

Liikkuva kara oli syönyt vastakierteet täysin. Tämä johtuu todennäköisesti karamoottorin säätövirheestä eli karamoottori on jatkanut pyörimistään ääriasennossa ja tämä on aiheuttanut kierteiden tuhoutumisen.

Vanhemman mallisen karamoottorin kohdalla johtopäätöksenä voidaan todeta, että vaikka karamoottoreissa on havaittavissa selkeää ulkoista korroosiota, niin karamoottorien vioittuminen ei johdu rakenteen kannalta olennaisten osien syöpmisestä vaan potentiometrin korroosiosta. Kuvasta 62 voidaan päätellä, että suola pääsee potentiometrille karamoottorin karan ja kotelon liitoksen kautta, sillä kiteytynyttä suolaa on vain karaa pyörittävällä moottorilla eikä sähköliitoksen kohdalla. Vanhemman mallisen karamoottorin korroosio-ongelmaan ei löydy kustannustehokasta ratkaisua materiaaleja vaihtamalla, vaan varmistamalla karan ja moottorin välisen tiiveyden.

Ensimmäistä uudemman mallista karamoottoria avatessa havaittiin, että kotelon sisään on päässyt suolaa kiteytymään hieman, mutta osat näyttivät päällisin puolin toimivilta, kuten kuvissa 65 ja 66 on esitetty.



Kuva 65. Uudemman mallinen karamoottori päädyistä avattuna. Hieman kiteytynyttä suolaa havaittavissa.

Karan kierteet olivat erinomaisessa kuvassa ja karan ulkokuoressa oli havaittavissa vähäistä korroosiota, kuten kuvassa 66 näkyy.



Kuva 66. Karamoottorin kara.

Karamoottorin moottori sekä potentiometri toimivat jännitelähteeseen kytkettynä ja liittimet olivat kunnossa, kuten kuvassa 67 näkyy.



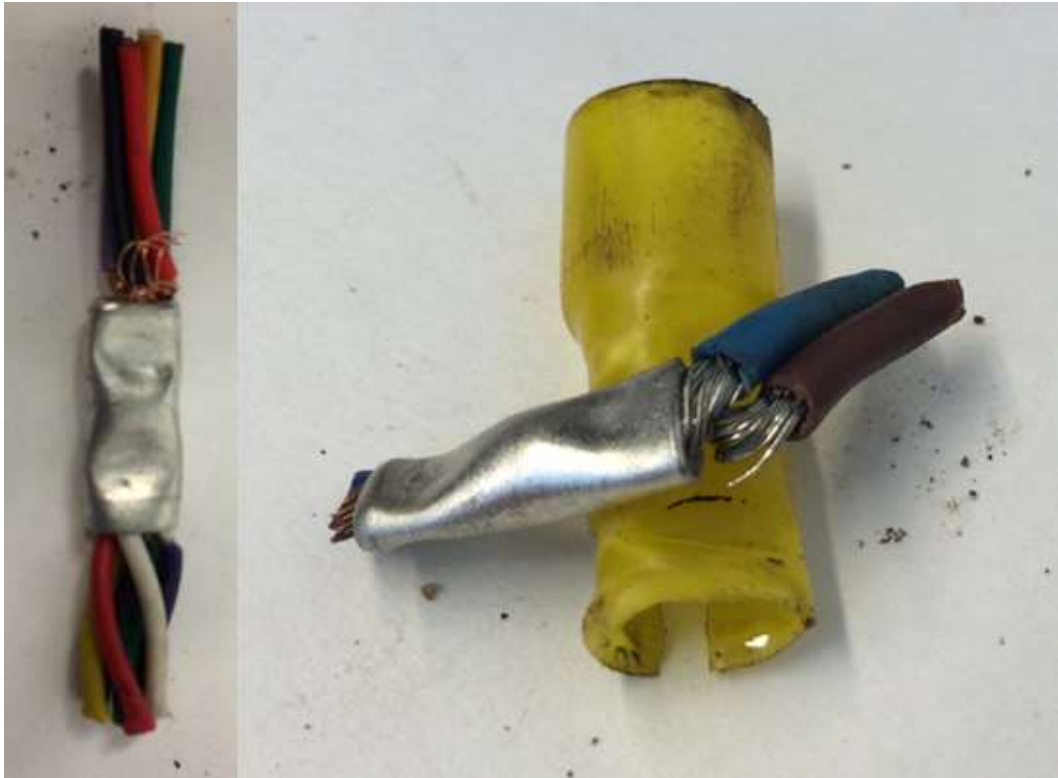
Kuva 67. Ensimmäisenä tutkitun uudemman mallisen karamoottorin liittimet.

Kotelon sisällä ei ollut havaittavissa vakavaa korroosiota, kuten kuvassa 68 näkyy.



Kuva 68. Ensimmäisenä avatun uudemman karamoottorin kotelon sisus.

Ensimmäisenä avatun, uudemman mallisen, karamoottorin johtimet oli katkaistu ja ne oli yhdistetty liittämällä, kuten kuvassa 69 näkyy. Vioittumisen syyksi paljastui vääränlaiset sähköliitokset johdoissa, kuten kuvassa 69 näkyy.



Kuva 69. Vasemmalla potentiometrille menevän johdon liitos ja oikealla moottorille menevän johdon liitos.

Potentiometrille tulevassa johdossa on maa, referenssi ja signaali kytketty yhteen ja moottorille tulevassa johdossa jännite ja maa on kytkettynä yhteen. Tämä aiheuttaa sen, että säätö ei toimi ja virta ei kulje moottorille.

Toista uudemman mallista karamoottoria avatessa havaittiin, että karamoottorille tulevien sähköliittimien ympäristössä oli ulkoisesti havaittavissa selkeää korroosiota, kuten kuvassa 70 näkyy.



Kuva 70. Karamoottorille tulevien sähköliittimien ympäristö.

Liittimiä irrottaessa oli heti havaittavissa, että korroosio oli tuhonnut toisen liittimistä, kuten kuvissa 71 ja 72 näkyy.



Kuva 71. Karamoottorille tulevat sähköliittimet.



Kuva 72. Karamoottorin sähköliittimet. Selkeää korroosiota on havaittavissa.

Karamoottorin kotelon sisällä oli havaittavissa selkeää korroosiota ja kiteytynyttä suolaa, kuten kuvassa 73 näkyy.



Kuva 73. Toisen avatun, uudemman mallisen, karamoottorin kotelon sisus.

Karamoottorin moottori sekä potentiometri toimivat jännitelähteeseen kytkettynä. Ratkaisu viimeisenä tutkitun karamoottorin ongelmaan ei löydy materiaalivalinnoista vaan liittimien tiiveyden parantamisesta.

6.1.2 Hydraulimoottori OMP 32 ja pulssianturi PNP AM:n automaattista

Hydraulimoottori OMP32 on orbital tyyppinen geroottorimoottori. Kuvassa 74 on esitettynä lautasen pyöritysmoottori eli hydraulimoottori OMP 32 ja kuvassa 75 on esitettynä pulssianturi PNP:n kiinnitys hydraulimoottoriin.

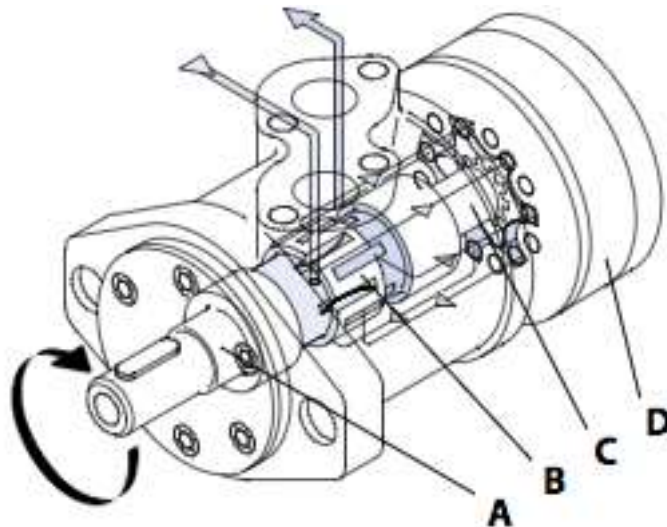


Kuva 74. Hydraulimoottori OMP 32 kiinnitettynä AM:n automaattiin.



Kuva 75. Pulssianturi PNP kiinnitettynä hydraulimoottoriin.

Kuvassa 76 on esitetty orbital tyyppisen geroottorimoottorin toimintaperiaate.



Kuva 76. Orbital tyyppisen geroottorimoottorin toimintaperiaate. A Ulostuloakseli, B Luistiventtiili, C Kardaaniakseli ja D Hammasrenkaat. (Danfoss 2015).

Useimmiten ongelmana lautasta pyörittävän hydraulimoottorin kohdalla on se, että akselin puolelta pääsee öljyt vuotamaan ulos. Pulssianturi syöpyy liitoksesta heti kun sitä suojaava peite rikkoontuu. Suojaava peite rikkoontuu yleensä

ulkoisesta syystä, kuten lapion iskusta. Sirotin on usein täysin lumen peitossa ja se putsataan esimerkiksi lapiota käyttäen. (Savander 2015.)

Kuvassa 77 on esitetty hydraulimoottorin akselin puoleinen pääty ennen pesua. Erittäin voimakasta korroosiota on havaittavissa visuaalisesti.



Kuva 77. Hydraulimoottorin ulostuloakselin puoleinen pääty.

Hydraulimoottoria avatessa kävi ilmi, että moottorin sisällä ei ole merkkiä minkäänlaisesta korroosiosta ja osat ovat hyväkuntoiset, kuten kuvissa 78, 79 ja 80 on esitetty. Kuvassa 80 on esitetty myös se osa akselia, josta korroosio alkaa.



Kuva 78. Avattu hydraulimoottori pohjan puolelta kuvattuna. Minkäänlaista korroosiota ei ole havaittavissa.



Kuva 79. Hydraulimoottorin pohja. Korroosiota ei ole havaittavissa.



Kuva 80. Hydraulimoottorin akseli. Korroosiota ei ole havaittavissa hydraulimoottorin kuoren sisäpuolella olevassa osassa. Nuolen kohdalta alkaa se osa, joka on kuoren ulkopuolella ja siinä on havaittavissa selkeää korroosiota. Nuolen kohta on tiivisteen kohdalla.

Taulukoissa 21 ja 22 on esitetty hydraulimoottorin akselin ja kuoren materiaalianalyysit.

Taulukko 21. Hydraulimoottorin akselin materiaalianalyysi.

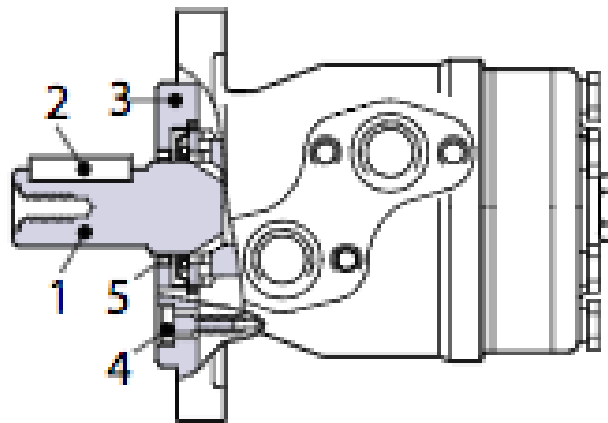
Alkuaine	%-osuus
Fe	97,3
Mn	1,3
Cr	1,1
Co	0,2
Cu	0,1
Pb	0,1
Materiaali	Teräs C-4140 (0,6)

Taulukko 22. Hydraulimoottorin kuoren materiaalianalyysi.

Alkuaine	%-osuus
Fe	98,8
Mn	0,9
Cu	0,2
Co	0,2
Pb	0,01
Materiaali	Teräs C-1117 (0,2)

Hydraulimoottorin akseli pääsee selkeästi syöpymään rakokorroosion vuoksi ja se johtaa siihen, että akselin ja tiivisteen välistä pääsee öljyä vuotamaan. Rakokorroosio pääsee syntymään akselin korroosiontuotekerroksen ja metallin

väliseen tilaan ja toisaalta tiivisteiden ja metallin väliseen tilaan. Vuotava öljy estää korroosiota aiheuttavan suolaliuoksen etenemisen ja siksi korroosioaurio ei etene akselia pidemmälle. Tähän pystytään materiaalivalinnoilla vaikuttamaan. Valmistajalta ostetun hydraulimoottorin osien vaihtaminen itse teettetyihin osiin olisi aikaavievää, hankalaa ja kallista, joten hydraulimoottorin osalta on järkevää etsiä toinen vaihtoehto suoraan valmistajalta. Kuten materiaalianalyysistä huomataan, niin hydraulimoottori on tehty helposti syöpyvästä teräksestä ja osat alkavat ruostua heti, kun ne ovat kosketuksissa suolan kanssa. Danfoss valmistaa OMP hydraulikkamoottoria OMP C -versiona, jossa osa osista on vaihdettu korroosiota kestäviin materiaaleihin, kuten kuvassa 81 on esitetty.



Kuva 81. Korroosiota kestävät osat: 1 ulostuloakseli, 2 kiila, 3 etulevy, 4 etulevyn ruuvit ja 5 nitrilipölysuoja ruostumattomasta teräksestä tehdyllä kapselilla (Danfoss 2015).

Hydrauliikka.fi kaupassa OMP hydraulikkamoottori maksaa 352 euroa (alv 0%) ja OMP C -hydraulikkamoottori maksaa 818 euroa (alv 0%) (Lindell 2015). Korroosiota kestäville osille hinnaksi tulee siis n. 2,3-kertainen OMP perusversioon nähden. Lisäksi toimitusajat ovat yli kaksinkertaiset (Lindell 2015). Yhdessäkään tässä työssä tarkastelussa olleista automaateista ei hydraulimoottoreita oltu jouduttu vaihtamaan kuin enintään kahdesti tarkasteluvälillä 1.10.2010-30.9.2014. Suurimpaan osaan automaateista moottori oli vaihdettu kerran tarkasteluvälillä. Tämä tarkoittaa sitä, että 4 vuoden aikana OMP-moottori tulisi joutua vaihtamaan kolme kertaa tai useammin, jotta OMP C -moottorin 2,3-kertainen hinta tulisi kannattavaksi. Tämä taas tarkoittaa sitä, että materiaalien vaihtaminen korroosiota paremmin kestäviin ja kalliimpiin ei tässä

tapauksessa ole järkevää. Kustannustehokkain tapa parantaa kestävyyttä lautasen moottorissa on panostaa jokaisen ajon jälkeiseen automaatin huolelliseen pesuun. Pesussa tulee painottaa lautasta pyörittävän moottorin huolellista pesua.

Pulssianturin kohdalla materiaalin vaihtaminen ei ole tehokas ratkaisu, sillä liitinmateriaalien vaihtaminen korroosionkestäviksi ja samalla sähköä hyvin johtaviksi olisi erittäin kallista. Kustannustehokkain ratkaisu on kouluttaa työntekijät pesemään pulssianturin ympäristö jokaisen ajon jälkeen huolellisesti suolasta ja opastaa sirottimen puhdistaminen lumesta siten, että lapiolla tai vastaavalla, ei vahingoiteta pulssianturia.

6.1.3 Kaasujousi AM:n automaatista

Kuvassa 82 on esitetty kaasujousi kiinnitettynä suolasirotinautomaattiin ja kuvassa 83 rikkiinäisenä irrotettu kaasujousi. Taulukossa 23 on esitetty kaasujousen materiaalianalyysin tulokset.



Kuva 82. Kaasujousi paikoillaan suolasirotinautomaatissa.



Kuva 83. Automaatista irrotettu ja vaurioitunut kaasujousi.

Taulukko 23. Am automaatin kaasujousen materiaalianalyysin tulokset.

Alkuaine	%-osuus
Fe	93,1
Zn	2,3
Cr	1,7
Mn	1,2
Ni	1
Co	0,5
Pb	0,2
Mo	0,1
Materiaali	Työkaluteräs L-2 (0,8)

Automaattien kaasujouset rikkoontuvat yleensä silloin, kun sirotilautanen nostetaan ylös. Kaasujousi murtuu pallonivelen varresta, kuten kuvassa 83 näkyy. (Savander 2015.) Kyseessä on korroosioväsyminen, joka alkaa korroosioauriona ja etenee väsymismurtumana. Murtumista voi edesauttaa se, että pallonivelen sisään pääsee suolaliuosta, mikä mahdollistaa pallonivelen syöpymisen. Oletettavasti suolasirotilautanen nostetaan ajon päätteeksi aina yläasentoon. Yläasennossa ollessaan pallonivel pääsee syöpymään siten, että sisempi pallo-osa syöpyy ulompaan kuppiosaan kiinni. Alas laskettaessa korroosiotuotekerros rikkoutuu, mutta aiheuttaa jännityksen pallonivelen varteen. Tätä kun toistetaan

riittävän monta kertaa, niin varteen pääsee ydintymään särö väsymisen johdosta. Lisäksi jousi altistuu ajonaikana jatkuvalle värinälle. Kun ydintynyt särö on edennyt riittävästi ja heikentänyt vartta, niin ylös nostettaessa riittävän jännityksen läsnä ollessa varsi murtuu.

Ratkaisuna ongelmaan voidaan joko materiaali vaihtaa paremmin korroosiota kestäväksi tai panostaa sirotuksen jälkeiseen huoltoon. Jokaisen ajon jälkeinen kaasujousien huolellinen pesu ja palloniveliä säännöllinen rasvaaminen pidentää kaasujousien elinikää.

Materiaalin valintaa varten suoritetaan painotettu vertailumenetelmä. Painotettua vertailumenetelmää varten on valittu materiaaleja, joiden myötölujuus ja väsymislujuus ovat vähintään yhtä hyviä kuin alkuperäisen materiaalin. Lisäksi vertailtavien materiaalien hinta on ollut lähellä alkuperäisen materiaalin hintaa. Jännityskorroosion kesto valittiin mukaan, koska olosuhteet ovat hyvät jännityskorroosiolle vaihdettaessa jousi passivoituvaan materiaaliin. Materiaalien ominaisuuksien arvot on saatu CES materiaalitietokannasta. Taulukossa 24 on esitetty valitut materiaalit ja niiden ominaisuudet sekä alkuperäinen materiaali ominaisuuksineen.

Taulukko 24. Vertailuun valitut ja alkuperäinen materiaali ominaisuuksineen. Jännityskorroosion kesto ja suolaveden kesto CES materiaalitietokannan arvoilla, jotka on jaettu seuraavasti: 1 huono, 2 rajoitettu käytettävyys, 3 keskinkertainen, 4 hyvä ja 5 erinomainen.

Materiaali (ruostumaton teräs)	Hinta [eur/kg]	PRE	Väsymislujuus (10 ⁷ sykliä) [Mpa]	Jännitys korroosi on kesto	Suola- veden kesto	Myötö - raja
202	2,51-2,7	17-23	385-437	3	5	515-760
414	1,57-1,64	11,5-13,5	364-398	5	5	620-700
414L	1,74-1,84	12,5-14,7	338-390	5	5	495-605
418	2,84-3,28	16,1-21,4	377-436	2	5	640-810
431	1,72-1,81	15-17	386-448	5	5	715-875
Alkuperäis- materiaali						
L2	2,06-2,1	-	149-157	-	2	497-523

Taulukossa 25 on esitetty valitut ominaisuudet ja niiden vertailu sekä painokerroin α laskeminen.

Taulukko 25. Ominaisuuksien vertailu ja painokerroin α laskeminen. Suolaveden kesto hävisi vertailussa kaikille muille ominaisuuksille sen takia, että kaikilla valituilla materiaaleilla suolaveden kesto on erinomainen.

Ominaisuuksien vertailu												Positiiviset valinnat	Painokerroin α
Ominaisuudet	1.- 2.	1.- 3.	1.- 4.	1.- 5.	2.- 3.	2.- 4.	2.- 5.	3.- 4.	3.- 5.	4.- 5.			
1. Suolaveden kesto	0	0	0	0								0	0
2. Väsytyslujuus	1				1	0	0					2	0,2
3. Hinta		1			0			0	0			1	0,1
4. PRE luku			1			1		1		0		3	0,3
5. Jännityskorroosion kesto				1			1		1	1		4	0,4
Positiivisten valintojen kokonaismäärä												10	$\Sigma\alpha=1$

Taulukossa 26 on esitetty vertailuun valittujen ominaisuuksien suhteelliset arvot B, jotka on laskettu kaavalla 14.

Taulukko 26. Ominaisuuksien suhteelliset arvot B.

Materiaali	Hinta	PRE	Väsytyslujuus	Jännityskorroosion kesto	Suolaveden kesto
202	80	60	80	60	100
414	100	20	80	100	100
414L	100	20	80	100	100
418	80	60	60	40	100
431	100	40	60	100	100

Taulukossa 27 on esitetty vertailtavien materiaalien suoriutumisindeksit γ , jotka on laskettu kaavalla 16.

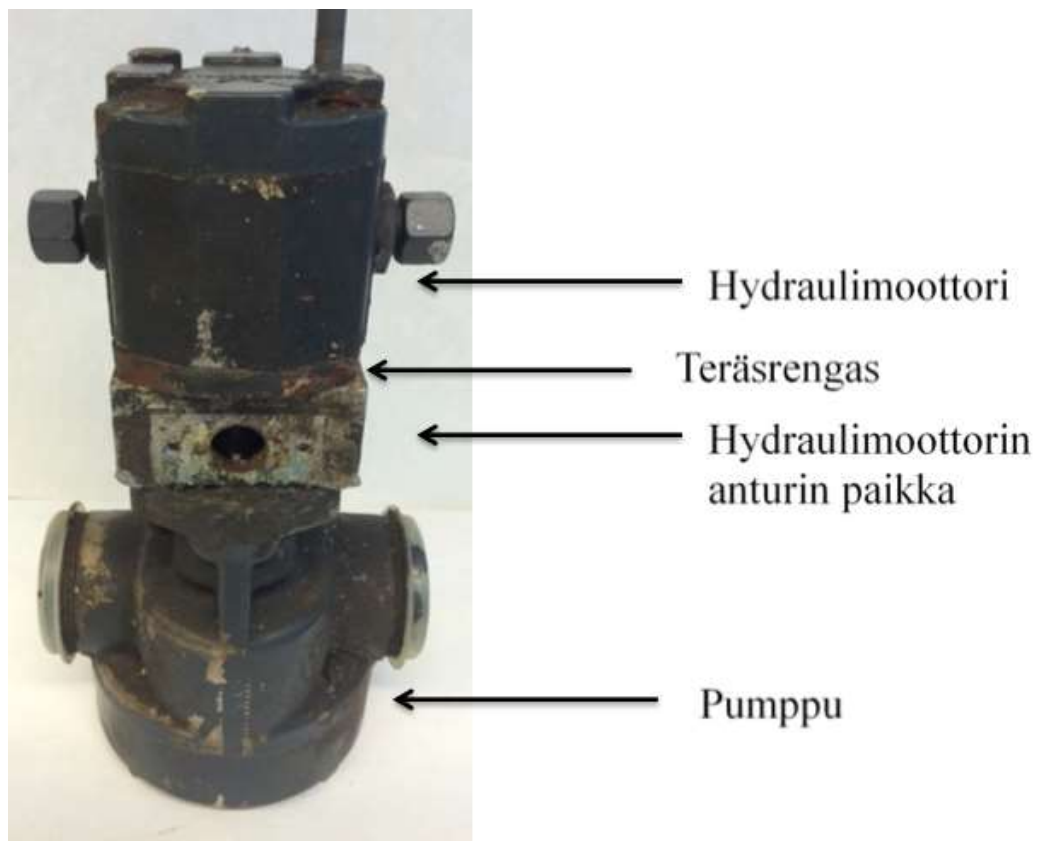
Taulukko 27. Vertailtavien materiaalien suoriutumisindeksit γ .

Materiaali	γ
202	66
414	72
414L	72
418	54
431	74

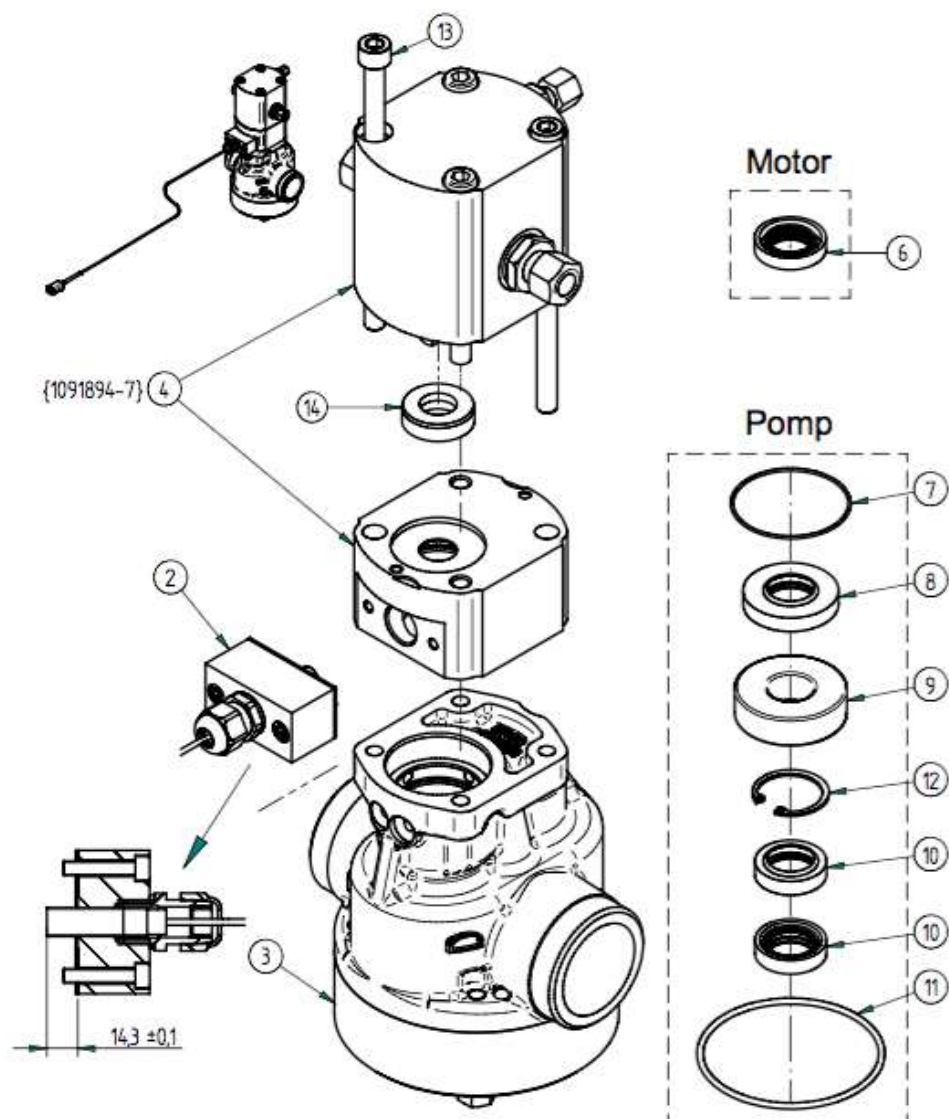
Alkuperäinen materiaali kannattaa vaihtaa korroosiota paremmin kestävään ruostumattomaan teräkseen 431:een. Se on kilohinnaltaan työkaluteräs L-2:ta halvempi, sen on korroosio-ominaisuuksiltaan erinomainen ja se kestää väsymistä hyvin. Huomioitavaa on, että vaikka kaasujousen materiaali vaihdettaisiin ruostumaton teräs 431:een, niin silti kaasujousen huolellinen pesu käytön jälkeen on ensiarvoisen tärkeää.

6.1.4 Liuospumppu Nido Stratos automaatista

Kuvassa 84 on esitetty valokuva Nido Stratos automaatista irrotetusta liuospumpusta ja kuvassa 85 on esitetty pumpun räjäytyskuva.

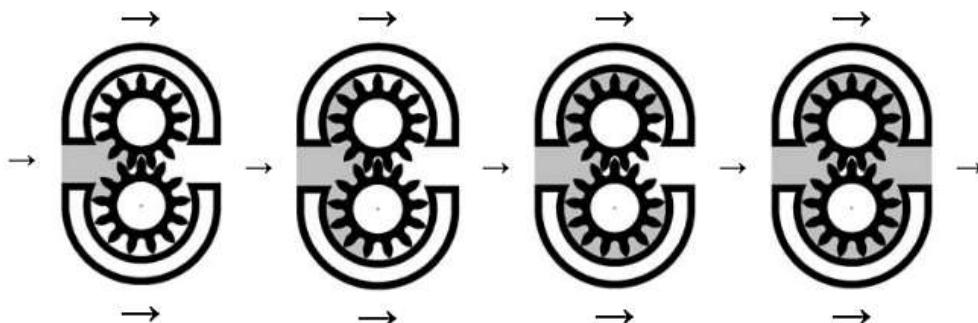


Kuva 84. Nido Stratos automaatista irrotettu liuospumppu. Hydraulimoottori on yritetty irrottaa huollossa, mutta pultti on katkennut. Teräsrenkaan tehtävänä on pitää hydraulimoottorin akselin tiivistettä paikoillaan.



Kuva 85. Liuospumpun räjäytyskuva. 2. Pumpun pyörintäänturi 3. Pumppu 95cm³ 4. Hydraulimoottori 6. Öljytiiviste 18x30x6 7. O-rengas 46x3 8. Öljytiiviste CC30x52x7 9. Keskitysrengas 10. Öljytiiviste CC30x42x7 11. O-rengas 62x2 12. Lukkorengas 13. Kiinnityspultti M10x155 14. Soviterengas Huom. kuvassa 86 esitettyä teräsrengasta ei ole räjäytyskuvassa esitettynä. (Nido 2012)

Kuvassa 86 on esitetty liuospumpun pumpun toimintaperiaate.



Kuva 86. Hammaspyöräpumpun toimintaperiaate. Toisen hammaspyörän akselille tuodaan käyttöteho ja toinen hammaspyörä pyörii mukana. Suolaliuos kulkee hammaspyöröiden ja kotelon välissä. (Scherzinger 2000)

Taulukossa 28 on esitetty materiaalianalyysissä selvitetty liuospumpun osien materiaalit.

Taulukko 28. Liuospumpun osien materiaalit.

Osa	Teräsrengas	Pumppu	Hydraulimoottorin	Hydraulimoottori	Hammaspyörän
Materiaali	TS L-2(0,8)	Cst Al Brnz-955	anturin paikka Alumiini (No Match)	Alumiini (No Match)	akseli Duplex 2205
Alkuaine	Pitoisuus [%]	Pitoisuus [%]	Pitoisuus [%]	Pitoisuus [%]	Pitoisuus [%]
Fe	96,2	4,3	0,15	0,32	66,7
Zn	2,8	0,5	0,13	4,46	-
Cu	0,5	89,5	0	0,06	0,2
Co	0,4	-	-	-	3
Sn	0,1	-	0,36	-	-
Pb	0	-	0	0,03	-
Cr	0	-	-	0,12	22,6
Ni	-	4,6	0,02	0	5,4
Mn	-	1,1	0,31	0,22	1,5
Nb	-	0,1	-	-	-
Zr	-	0	-	-	-
Al	-	-	>98,85	93,28	-
Si	-	-	0,13	0,12	-
P	-	-	0,02	-	-
Se	-	-	0,03	-	-
Bi	-	-	0	-	-
Mg	-	-	-	1,39	-
Mo	-	-	-	1,39	2,9
V	-	-	-	1,39	0,2
Ti	-	-	-	1,39	0,1

Tässä työssä tarkasteltava liuospumppu on vaihdettu, koska pumpusta on päässyt suolaliuosta hydraulimoottorin alempaan osaan, jossa pumpun pyörinnän anturointi tapahtuu (Peltonen 2015b). Tämä aiheuttaa seuraavanlaisia ongelmia:

-Alumiinista valmistettu hydraulimoottorin anturointia varten oleva kappale syöpyy, kuten kuvassa 87 on esitetty. Kuvan 21 galvaanisesta sarjasta nähdään, että alumiinipronssinen pumppu ja alumiinikappale muodostavat galvaanisen parin ja alumiini epäjalompana syöpyy. Pumpun pyörintää valvova optinen anturi lukee akseliin työstettyä koloa, joka on esitetty kuvassa 87 ja kolon peittyminen epäpuhtauksilla (alumiinin korroosiotuotteet tai suola) estää anturin toiminnan. Nido Stratos suolausautomaatin ohjauslogiikka on rakennettu siten, että toimilaitteen pyörintänopeustiedon puuttuessa, asetetaan toimilaitteen hydrauliventtiili täysin auki eli laite menee varmuuden vuoksi täydelle teholle. Tämä johtaa liian suureen suolaliuoksen levitykseen ja vikakoodiin kuljettajan ohjauslaitteen näytölle. (Peltonen 2015b.)



Kuva 87. Hydraulimoottorin anturin paikka, jossa on nähtävissä selkeää korroosiota. Kolossa nähtävissä anturoitava akseli.

Kuvassa 88 on esitetty alumiinisen anturin paikan ja pumpun väliin jäänyttä suolaa. Kuvassa 89 on esitetty hammaspyörää pyörittävä akseli, johon on työstetty kolot pumpun pyörintänopeuden anturointia varten.



Kuva 88. Alumiinisen anturin paikan ja pumpun väliin kiteytynyttä suolaa.



Kuva 89. Akseliin työstetty kolo, jota pumpun pyörintää valvova optinen anturi lukee.

-Hydraulimoottorin ja pumpun toisiinsa kiinnittävät, teräksestä valmistetut, pultit syöpyvät, sillä kuten kuvan 21 galvaanisesta sarjasta nähdään alumiinipronssinen pumppu ja teräspultit muodostavat galvaanisen parin ja teräs epäjalompana syöpyy. Syöpyneet pultit on esitetty kuvassa 90.

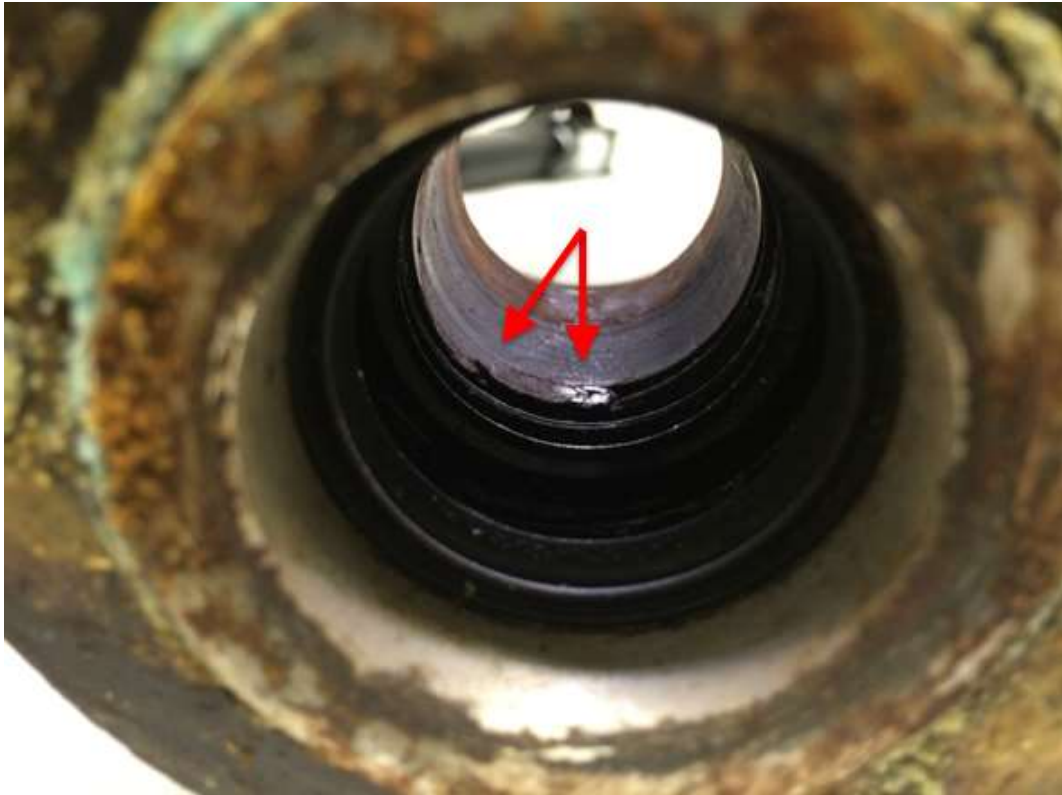


Kuva 90. Hydraulimoottorin kiinnityspultit. Kyseiset pultit kiinnittävät hydraulimoottorin osat toisiinsa. Alumiinin korroosiotuotteita on selvästi nähtävillä.

Teräspulttien syöpyminen pumpun runkoon kiinni estää tai vaikeuttaa hydraulimoottorin irrottamista pumpusta, sillä kuten kuvasta 85 nähdään, niin moottori on pumpun rungossa kiinni kahdella pultilla. Syöpynyt pultti katkeaa helposti irrotusta yrittäessä kuten tutkittavan liuospumpun kohdalla oli käynyt, kuva 86. Pultin katkeaminen johtaa siihen, että joko pumpun tai moottorin mennessä rikki joudutaan vaihtamaan koko liuospumppu vain rikki menneen osan sijaan, mikä tekee huollosta luonnollisesti kalliimpaa. Lisäksi hydraulimoottorin osat ovat toisiinsa kiinnitettynä kahdella teräspultilla ja myös tässä syntyy galvaaninen pari, kuten kuvan 21 galvaanisesta sarjasta nähdään ja epäjalompi alumiini syöpyy. Tämä vaikeuttaa pulttien irrottamista.

Liuospumpun osia tutkittaessa ilmeni myös seuraavat havainnot:

- Pumpun akselin liukulaakeri oli vioittunut, kuvat 91, 92 ja 93
- Hiertymiskorroosiota pumpun akselissa, kuva 94
- Koloja hammaspyörässä, kuva 95



Kuva 91. Akselin liukulaakerin halkeama kuvattuna liuospumpun ja pumpun moottorin väliseltä pinnalta. Vasen nuoli osoittaa liukulaakerin yläpinnan murtumaa ja oikea nuoli murtunutta sisäpintaa, jonka vierestä on irronnut pala liukulaakeria.



Kuva 92. Liukulaakerin yläreuna. Selkeää kulumaa on havaittavissa.



Kuva 93. Liukulaakerin sisäpinta, jossa näkyy kulumajälkiä.



Kuva 94. Hiertymiskorroosion jälkiä akselissa. Jäljet ovat tiivisteiden kohdilla.



Kuva 95. Koloja hydraulimoottorin pyörittämässä hammaspyörässä.

Peltosen kertomuksen ja osista tehtyjen havaintojen pohjilta voidaan tehdä seuraavanlainen päätelmä. Suola pääsee akselin ja akselin tiivisteiden välistä hydraulimoottorille hiertymiskorroosion aiheuttaman akselin kulumisen vuoksi. Tätä ongelmaa ei voida ratkaista materiaalivalinnoilla, sillä kuten teoriaosuudessa mainittiin, niin hiertymiskorroosion välttämiseksi pumppuihin ainoa kestävä ratkaisu on käyttää ei hiertäviä tiivisteitä, kuten paljettiivistettä. Huomioitavaa on kuitenkin myös se, että hammaspyörä on koloilla ja liukulaakeri erittäin kulunut. Tämä voi johtua kahdesta syystä:

- Käytettävä suolaliuos sisältää epäpuhtauksia, jotka kuluttavat pumpun sisäosaa.
- Pumppu on ajon jälkeen jäänyt tyhjäksi, jolloin suola on päässyt kovettumaan. Kovettunut suola aiheuttaa mekaanista räsitusta osiin, kun

pumppu laitetaan käyntiin. On mahdollista, että epäpuhtaudet tai kovettunut suola lisäävät entisestään hiertymiskorroosion vaikutusta.

Ensimmäisestä vaihtoehdosta päästään eroon kiinnittämällä huomiota suolaliuoksen valmistusprosessissa siihen, että epäpuhtauksia, kuten hiekkaa ei pääse suolaliuoksen sekaan. Toiseen ongelmaan ratkaisuna on jälleen käyttäjien kouluttaminen, jotta pumppu ei pääse koskaan olemaan tyhjänä.

6.2 Automaattien kulujen vuosimallien ja valmistajien välinen tarkastelu

Taulukossa 29 on esitetty vuosimalleittain laitemäärät molemmilta valmistajilta ja taulukossa 30 on esitetty molempien laitevalmistajien laitteiden kustannukset vuosimalleittain ja vuosittain.

Taulukosta 30 nähdään, että AM-automaateista vuonna 2006 käyttöönotetut automaatit ovat olleet selkeästi kalleimmat jos lasketaan kustannuksen yhtä laitetta kohti. Yhtenä syynä tähän on korkeat törmäyksistä tai muusta huolimattomuudesta syntyneistä kuluista, kuten taulukosta 31 nähdään. Nidon laitteista ei voida tehdä tarkkoja johtopäätöksiä vuosimallien kustannuserojen suhteen, sillä Nidon vuosimallien 05 ja 06 koneita on molempia ollut käytössä vain yhdet. Taulukosta 30 huomataan myös, että käyttökustannukset ovat nousseet selkeästi vuosien 2012 ja 2013 välille. Tämäkin selittyy taulukosta 31 nähtävistä kasvaneista onnettomuuskuluista.

Taulukko 29. Molempien laitevalmistajien laitemäärät vuosimalleittain jaoteltuna.

VM	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	Yht
Molemmat									
merkit	5	1	16	18	15	31	20	12	118
NIDO	0	0	1	1	0	0	0	12	14
AM	5	1	15	17	15	31	20	0	104

Taulukko 30. Molempien laitevalmistajien laitteiden kustannukset vuosimalleittain ja vuosittain.

Molemmat valmistajat

Automaatin vm	2010-2011	2011-2012	2012-2013	2013-2014	yht	per laite
2003	5 896	4 096	8 662	7 077	25 731	5146
2004	840	1 903	65	2 018	4 826	4826
2005	22 613	28 686	35 343	26 096	112 738	7046
2006	43 459	28 287	48 105	29 989	149 840	8324
2007	18 408	13 408	24 145	28 251	84 213	5614
2008	38 581	44 913	37 475	62 731	183 700	5926
2009	15 002	18 548	28 261	26 643	88 453	4423
2010	11 371	17 098	25 289	25 153	78 911	6576
YHT	156 169	156 937	207 346	207 959	728 411	6173

AM

Automaatin vm	2010-2011	2011-2012	2012-2013	2013-2014	yht	per laite
2003	5 896	4 096	8 662	7 077	25 731	5146
2004	840	1 903	65	2 018	4 826	4826
2005	18 896	24 127	34 856	23 400	101 279	6752
2006	32 179	26 193	47 315	28 369	134 057	7886
2007	18 408	13 408	24 145	28 251	84 213	5614
2008	38 581	44 913	37 475	62 731	183 700	5926
2009	15 002	18 548	28 261	26 643	88 453	4423
YHT	129 802	133 187	180 780	178 490	622 259	5983

Nido

Automaatin vm	2010-2011	2011-2012	2012-2013	2013-2014	yht	per laite
2005	3 716	4 559	487	2 696	11 459	11459
2006	11 280	2 094	790	1 620	15 783	15783
2010	11 371	17 098	25 289	25 153	78 911	6576
YHT	26 367	23 750	26 566	29 469	106 153	7582

Taulukko 31. Molempien laitevalmistajien automaattien muut kulut vuosimalleittain ja vuosittain. Muut kulut tarkoittavat onnettomuuksista ja muista vastaavista aiheutuneita kuluja.

Molemmat
merkit

Automaatin vm	2010- 2011	2011- 2012	2012- 2013	2013- 2014	YHT	per laite
2003	0	0	260	3 482	3 742	748
2004	0	0	0	0	0	0
2005	0	0	5 034	5 320	10 354	647
2006	96	0	12 368	5 441	17 905	995
2007	0	0	676	3 240	3 916	261
2008	0	386	3 531	17 355	21 273	686
2009	0	0	6 282	3 948	10 229	511
2010	0	0	0	552	552	46
YHT	96	386	28 151	39 337	67 971	576

AM

Automaatin vm	2010- 2011	2011- 2012	2012- 2013	2013- 2014	YHT	per laite
2003	0	0	260	3 482	3 742	748
2004	0	0	0	0	0	0
2005	0	0	4 638	3 371	8 009	534
2006	96	0	12 368	4 611	17 075	1004
2007	0	0	676	3 240	3 916	261
2008	0	386	3 531	17 355	21 273	686
2009	0	0	6 282	3 948	10 229	511
YHT	96	386	27 755	36 006	64 244	618

Nido

Automaatin vm	2010- 2011	2011- 2012	2012- 2013	2013- 2014	YHT	per laite
2005	0	0	396	1 949	2 345	2345
2006	0	0	0	830	830	830
2010	0	0	0	552	552	46
YHT	0	0	396	3 331	3 727	266

Taulukosta 30 huomataan myös, että AM:n automaattit ovat olleet käyttökustannuksiltaan n.1600e/laite halvemmat kuin Nidon automaattit. Tulosta vääristää myös tässä tapauksessa vuosimallien 05 ja 06 yksittäiset koneet, joiden kustannukset ovat olleet erittäin suuret. Kuitenkin, jos tarkastellaan pelkästään Nidon vuosimallin 2010 automaattien kustannuksia per laite, niin silti käyttökustannukset ovat n.600e/laite kalliimmat kuin AM:n automaateilla. Tämän työn perusteella on suositeltavaa hankkia AM-automaatteja.

7 Yhteenveto

AM:n ja Nidon automaatteja vertailtaessa huomattiin, että AM:n automaattit ovat käyttökuluiltaan halvemmat. Tutkimuksessa käytettävä aineisto Nidon osalta oli kuitenkin huomattavasti suppeampi, joten jatkotutkimus aiheesta on suositeltava.

Vuosimallien vertailussa havaittiin, että AM-automaateista vuonna 2006 käyttöönotetuilla automaateilla oli korkeimmat käyttökulut. Lisäksi havaittiin selkeä kustannusten nousu siirryttäessä tarkastelussa aikaväliltä 2011-2012 aikavälille 2012-2013. Korkeat käyttökulut AM:n 2006 käyttöönotetuissa automaateissa ja yleinen kustannusten nousu olivat molemmat selitettävissä onnettomuuksista johtuneista kuluista. Jatkotutkimus olisi suositeltavaa suorittaa onnettomuuskustannuksien nousun syistä. Nidon automaateille ei voitu suorittaa vuosimallien vertailua, sillä suurin osa automaateista oli otettu käyttöön vuonna 2010 ja siksi järkevää vertailua ei ollut mahdollista tehdä.

AM:n automaateista tutkittaviksi osiksi valittiin karamoottori, HD-moottori OMP 32 Em, kaasujousi ja pulssianturi PNP. Nidon automaattien osista valittiin tutkittavaksi liuospumppu ja karamoottori.

Karamoottoreiden vaurioanalyysissä selvisi, että vanhemman mallisessa karamoottorissa rikkoutumisen aiheuttaa potentiometrin syöpyminen ja ratkaisu ongelmaan on karamoottorin kopan tiiveyden parantaminen. Uudemman mallisessa karamoottorissa ongelmana on sähköliitosten huono tiiveys, mikä johtaa liittimien syöpymiseen. Ratkaisu ongelmaan on liittimien tiiveyden parantaminen.

Lautasta pyörittävän hydraulimoottorin akseli pääsee syöpymään rakokorroosion vuoksi ja se aiheuttaa hydraulioöljyn vuotamisen ulos. Hydraulimoottori olisi mahdollista varustaa korroosiota paremmin kestäväillä osilla, mutta tämä ratkaisu ei ole kustannuksiltaan järkevä. Kustannustehokkain tapa parantaa kestävyyttä lautasen moottorissa on panostaa jokaisen ajon jälkeiseen moottorin huolelliseen

pesuun. Pulssianturi syöpyy liitoksesta heti, kun sitä suojaava peite rikkoontuu. Suojaava peite rikkoontuu yleensä ulkoisesta syystä, kuten lapion iskusta. Ongelma ratkeaa käyttökoulutuksella, jossa painotetaan pulssianturin ympäristön puhdistamisen turvallisia keinoja.

Automaattien kaasujouset murtuvat pallonivelen varresta sirotinlautasta ylösnostettaessa. Jännityskorroosio aiheuttaa ydintyneet särön kaasujousen varteen. Ratkaisuna ongelmaan voidaan joko materiaali vaihtaa paremmin korroosiota kestäväksi tai panostaa ajon jälkeiseen huoltoon. Jokaisen ajon jälkeinen kaasujousien huolellinen pesu ja palloniveliä säännöllinen rasvaaminen pidentää kaasujousien elinikää. Materiaalin valinta suoritettiin painotetulla vertailumenetelmällä. Menetelmää varten valittiin materiaaleja, joiden myötölujuus ja väsymislujuus ovat vähintään yhtä hyviä kuin alkuperäisen materiaalin. Lisäksi vertailtavien materiaalien hinta on ollut lähellä alkuperäisen materiaalin hintaa. Materiaalien valinta menetelmää varten suoritettiin CES materiaalitietokannassa. Kustannustehokas valinta kaasujousen materiaaliksi on ruostumaton teräs 431.

Nido automaatista irroitettu liuospumppu oli päässyt syöpymään hydraulimoottorin nopeutta säätelevää anturin toimintaa haitaten. Pumpattava suola pääsee hammaspyörää pyörittävän akselin ja tiivisteen välistä nousemaan anturille hiertymiskorroosion aiheuttaman akselin ohentumisen takia. On suositeltavaa vaihtaa tiivisteet ei hiertäviin tiivistisiin, kuten paljettiivisteeseen. Huomioitavaa on kuitenkin myös se, että hammaspyörä on koloilla ja liukulaakeri erittäin kulunut. On selvää, että pumpattavan suolaliuoksen mukana pääsee epäpuhtauksia pumpulle tai pumppu on jätetty tyhjänä seisomaan, jolloin suola on päässyt kiteytymään pumpun sisälle. Epäpuhtaudet pumpun sisällä voivat vahvistaa hiertymiskorroosion vaikutusta tai aiheuttaa muita ongelmia. Suosittelen suolaliuoksen valmistusprosessin kehittämistä puhtaampaan suuntaan, jotta epäpuhtaudet eivät pääse pumpulle. Lisäksi suosittelen automaattien kuljettajille käyttökoulutusta siitä, että liuospumppu ei saa missään tilanteessa jäädä tyhjäksi.

Lähteet

Aebi Schmidt. 2014. Winter Maintenance Product Range - De-icing. Esite. 18 s.

Alatyppö, V. & Aromaa, J. & Holmikari, M. 2008. Kaliumformiaatin korroosiovaikutukset. Tiehallinnon selvityksiä 31/2008. Tiehallinto, Helsinki. 60 s.

Antila, A & Karppinen, M & Leskelä, M & Mölsä, H & Pohjakallio, M. 2005. Tekniikan kemia. 8.painos. Helsinki: Edita Publishing Oy. 303 s.

Arctic Machine. 2014a. AM SALO 5000, 7000 ja 9000 sarjat. Käyttöohjekirja. Iivesi. 47 s.

Arctic Machine. 2014b. AM SALO 5000, 7000 ja 9000 sarjat. Varaosaluettelo. Versio 11.9.37/14. Iivesi. 138 s.

Arctic Machine. 2011. AM 3000-sarja sirotteluautomaatti liuoslaitteella. Käyttöohjekirja, huolto-ohjeet ja varaosat. Versio 1.1.10/11. Iivesi. 39 s.

Aromaa, J. 2014. MT-0.3301 Korroosionestotekniikka luentomateriaali. Julkaisematon.

Aromaa, J. 2012. Korroosionestotekniikan perusteet. Kurssimoniste. Aalto yliopiston kemiantekniikan korkeakoulun julkaisuja. Espoo. 131 s.

American Water Works Association (AWWA). (2014). External Corrosion Control for Infrastructure Sustainability - Manual of Water Supply Practices, M27 3rd Edition. American Water Works Association (AWWA). 110s.

Callister, W.Jr. 2007. Materials Science and Engineering an Introduction. 7.painos. Yhdysvallat: John Wiley & Sons. 721 s.

Danfoss. 2015. Technical Information Orbital Motors General. Saatavilla: <http://files.danfoss.com/documents/orbital%20motors%20technical%20information%20manual/52010232.pdf>

Davis, J.R. 2000. Corrosion - Understanding the Basics. ASM International. 563 s.

Davis, J.R. 2001. Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance. Maney Publishing. 328s.

DOW Chemical Company. 2003. Calcium Chloride Handbook. A Guide to Properties, Forms, Storage and Handling. 27 s.

Fontana, M. 1987. Corrosion Engineering. 3.painos. Singapore: McGraw-Hill Book Company. 556 s.

Hellstén, P. & Nysten, T. 2001. Vaihtoehtoisten liukkauden-torjunta-aineiden kemialliset reaktiot pohjaveteen kulkeutumisessa. Suomen Ympäristö 515. 68 s.

Hienonen, R. & Lahtinen, R. 2007. Korroosio ja ilmastolliset vaikutukset elektroniikassa. VTT Publications 623. Edita Prima Oy, Helsinki. 243 s. + liit.

Hillerns F. 2001 Thermophysical properties and corrosion behaviour of secondary coolants. ASHRAE Winter Meeting. Atlanta.

Houska, C. 2005. Stainless steels in architecture, building and construction. Guidelines for Corrosion Prevention. Nickel Institute Reference Book Series No11 024. Last revised: Elokuu 2014. 44 s.

Huuskonen, O. 2015. Suolasirotinlaitteistoissa käytettävät suolat. Henkilökohtainen tiedonanto. 7.8.2015.

Kerko, E. 2005. Kaliumformiaatin maaperävaikutukset Kauriansalmen pohjavesialueella. Pro gradu-tutkielma. Geologian laitos. 50 s.

Kivelä, H., Nenonen, A., Nysten, T., Hellstén, P. & Tuorila, H. 2003. Vaihtoehtoiset tiesuolat maistuvat vasta korkeina pitoisuuksina. Vesitalous 1/2003. s. 18-21.

Koch, G.H., Brongers, M.P.H., Thompson, N.G., et al., Corrosion Cost and Preventive Strategies in the United States. FHWA-RD-01-156, Federal Highway Administration, 2001. 771 s.

Kutz, M. 2006. Mechanical Engineer's Handbook Third Edition - Materials and Mechanical Design. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. 1360 s.

Leygraf, C. 1995. Atmospheric Corrosion, In: Corrosion mechanisms in theory and practice, ed. Marcus, P. & Oudar, J. Marcel Dekker, New York. s. 421-455.

Lindell, R. 2015. OMP hydraulimoottorien hinnat hydrauliiikkakauppa.fi:ssä. Henkilökohtainen tiedonanto. 9.6.2015

Litendahl, I. 2015. Destia Oy:n suolausautomaattien kesäkäyttö ja hiekoituskäyttö. Henkilökohtainen tiedonanto. 25.8.2015.

Mackay, R. 2004. Practical Pumping Handbook. Elsevier. 281 s.

McNally Institute. 2015. Fretting Corrosion. Viitattu 4.11.2015. Saatavilla: <http://www.mcnallyinstitute.com/CDweb/f-html/f036.htm>

Moran, V.M., Abron, L.A. & Weinberger, L.W. 1991. A Comparison of conventional and alternative deicers. An environmental impact perspective. In: Chemical deicers and the environment. D'Itri F.M. 1992. Lewis Publishers, Michigan, USA. s. 341-361.

Nido. 2012. STRATOS B70LC-36 VCLN-490CS Spare parts list. Holten. 212 s.

Nido. 2005. STRATOS B90-42 VCLN-660 levittimen Käyttöohjekirja. Holten. 76 s.

Peltonen Tomi. 2015a. Henkilökohtainen tiedonanto. Wihuri Oy. 12.6.2015.

Peltonen Tomi. 2015b. Henkilökohtainen tiedonanto. Wihuri Oy. 25.8.2015.

Savander Heikki. 2015. Henkilökohtainen tiedonanto. 15.6.2015.

Scherzinger. 2000. Operating Instructions. Rotary Gear Pumps 51-551. Saatavilla: <http://www.lobe.dk/documents/00088.pdf>

Schmitt, G. 2009. Global Needs for Knowledge Dissemination, Research, and Development in Materials Deterioration and Corrosion Control. The World Corrosion Organization. 44 s.

SFS-EN ISO 8044. 2000. Metallien ja metalliseosten korroosio. Termit ja määrittelyt. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS. 55 s.

Tiehallinto. 2004. Pohjaveden suojaus tien kohdalta. Tiehallinto, Helsinki. 32 s.

Tiehallinto. 2001. Teiden talvihoito. Menetelmätieto - Toteuttamisvaiheen ohjaus. Tiehallinto, Helsinki. 51 s. + liit.

Verink Jr, E. 2011. Designing to prevent corrosion. In: Uhlig's Corrosion Handbook, 3.painos. Revie, R. John Wiley & Sons, New York. s. 83-91.

Vestola, E. & Pohjanne, P. & Carpén, L. & Kaunisto, T. & Ahlroos, T. 2006. Kalsiumkloridin sivuvaikutukset. Tiehallinnon selvityksiä 38/2006. Tiehallinto, Helsinki. 71 s. + liit.

WebElements. 2015. Periodic Table, Calcium chloride. Viitattu 12.10.2015.
<http://www.webelements.com/webelements/compounds/text/Ca/Ca1Cl2-10043524.htm>

Liitteet

Liite 1. Taulukot huoltokuluiltaan kymmenestä kalleimmasta ja halvimmasta AM:n automaattista.

Taulukko 1. Huoltokuluiltaan kymmenen kalleinta AM:n automaattia.

Esine	Käyttö- kulut	Korroosio	Esine	Käyttö- kulut	Korroosio	Esine	Käyttö- kulut	Korroosio	Esine	Käyttö- kulut	Korroosio	Korroosio yht	Käytökulut yht
154289 SALO 5000 COMBI (2006)	3 675	3 675	154289 SALO 5000 COMBI (2006)	1 822	1 822	154289 SALO 5000 COMBI (2006)	9 887	4 659	154289 SALO 5000 COMBI (2006)	5 103	4 960	15 117	20 488
154286 SALO 5000 COMBI (2006)	2 010	2 010	154286 SALO 5000 COMBI (2006)	4 428	4 428	154286 SALO 5000 COMBI (2006)	4 855	4 855	154286 SALO 5000 COMBI (2006)	2 316	2 316	13 609	13 609
154099 SALO 3007 (2005)	1 355	1 355	154099 SALO 3007 (2005)	3 486	3 486	154099 SALO 3007 (2005)	2 383	2 383	154099 SALO 3007 (2005)	5 197	5 197	12 421	12 421
154527 SALO 5000 COMBI (2007)	3 609	3 609	154527 SALO 5000 COMBI (2007)	2 572	2 572	154527 SALO 5000 COMBI (2007)	4 781	4 781	154527 SALO 5000 COMBI (2007)	1 253	1 253	12 215	12 215
154166 SALO 8000 COMBI (2005)	2 841	2 841	154166 SALO 8000 COMBI (2005)	1 324	1 324	154166 SALO 8000 COMBI (2005)	6 164	6 164	154166 SALO 8000 COMBI (2005)	1 250	1 250	11 579	11 579
154504 SALO 5000 COMBI (2007)	2 013	2 013	154504 SALO 5000 COMBI (2007)	626	626	154504 SALO 5000 COMBI (2007)	3 075	3 075	154504 SALO 5000 COMBI (2007)	5 167	5 167	10 880	10 880
154297 SALO 5000 COMBI (2006)	2 843	2 843	154297 SALO 5000 COMBI (2006)	632	632	154297 SALO 5000 COMBI (2006)	5 177	5 177	154297 SALO 5000 COMBI (2006)	1 735	1 535	10 186	10 386
154825 AM SALO 3009 (2008)	1 140	1 140	154825 AM SALO 3009 (2008)	6 860	6 860	154825 AM SALO 3009 (2008)	1 406	674	154825 AM SALO 3009 (2008)	3 336	1 289	9 964	12 743
154520 SALO 8000 COMBI (2007)	2 446	2 446	154520 SALO 8000 COMBI (2007)	1 411	1 411	154520 SALO 8000 COMBI (2007)	2 352	2 352	154520 SALO 8000 COMBI (2007)	3 606	3 606	9 815	9 815
154714 AM SALO 5000 COMBI (2008)	6 960	6 960	154714 AM SALO 5000 COMBI (2008)	2 047	2 047	154714 AM SALO 5000 COMBI (2008)	1 350	212	154714 AM SALO 5000 COMBI (2008)	2 376	439	9 658	12 732

Taulukko 2. Huoltokuluiltaan kymmenen halvinta AM:n automaattia.

Esine	Käyttö- kulut	Korroosio	Esine	Käyttö- kulut	Korroosio	Esine	Käyttö- kulut	Korroosio	Esine	Käyttö- kulut	Korroosio	Korroosio yht	Käyttökulut yht
154723 AM SALO 5000 COMBI (2008)	1 047	1 047	154723 AM SALO 5000 COMBI (2008)	921	921	154723 AM SALO 5000 COMBI (2008)	0	0	154723 AM SALO 5000 COMBI (2008)	0	0	0	1 968
154596 SALO 6000 COMBI (2007)	682	682	154596 SALO 6000 COMBI (2007)	114	114	154596 SALO 6000 COMBI (2007)	1 192	868	154596 SALO 6000 COMBI (2007)	354	166	1 829	2 342
154711 AM SALO 5000 COMBI (2008)	115	115	154711 AM SALO 5000 COMBI (2008)	217	217	154711 AM SALO 5000 COMBI (2008)	253	253	154711 AM SALO 5000 COMBI (2008)	1 302	1 107	1 692	1 887
154722 AM SALO 5000 COMBI (2008)	875	875	154722 AM SALO 5000 COMBI (2008)	307	307	154722 AM SALO 5000 COMBI (2008)	471	91	154722 AM SALO 5000 COMBI (2008)	3 454	299	1 572	5 107
154963 AM SALO 8000 COMBI (2009)	339	339	154963 AM SALO 8000 COMBI (2009)	822	822	154963 AM SALO 8000 COMBI (2009)	0	0	154963 AM SALO 8000 COMBI (2009)	394	394	1 556	1 556
155233 AM 5000 COMBI (2009)	533	533	155233 AM 5000 COMBI (2009)	656	656	155233 AM 5000 COMBI (2009)	1 752	91	155233 AM 5000 COMBI (2009)	468	156	1 437	3 409
154971 AM SALO 5000 COMBI (2009)	521	521	154971 AM SALO 5000 COMBI (2009)	609	609	154971 AM SALO 5000 COMBI (2009)	293	0	154971 AM SALO 5000 COMBI (2009)	3 039	227	1 357	4 462
154726 AM SALO 5000 COMBI (2008)	505	505	154726 AM SALO 5000 COMBI (2008)	684	684	154726 AM SALO 5000 COMBI (2008)	406	91	154726 AM SALO 5000 COMBI (2008)	588	0	1 280	2 183
154965 AM SALO 5000 COMBI (2009)	0	0	154965 AM SALO 5000 COMBI (2009)	324	324	154965 AM SALO 5000 COMBI (2009)	401	401	154965 AM SALO 5000 COMBI (2009)	0	0	725	725
154725 AM SALO 5000 COMBI (2008)	258	258	154725 AM SALO 5000 COMBI (2008)	345	345	154725 AM SALO 5000 COMBI (2008)	195	0	154725 AM SALO 5000 COMBI (2008)	2 323	0	602	3 120